

UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN

FACHBEREICH PHYSIK

DIDAKTIK DER PHYSIK

Offene Experimente in der Lehramtsausbildung

Analyse physikalischer Phänomene für eine naturwissenschaftliche Experimentierweise

Dem Fachbereich Physik zur Erlangung
des Doktorgrades Dr. phil. nat. vorgelegte Dissertation

eingereicht im: November 2008,
von: Dipl. Phys. Thomas Braun
geboren am 29. März 1973
in Duisburg

1. Gutachter: Prof. Dr. U. Backhaus (Duisburg-Essen)
2. Gutachter: Prof. Dr. H.J. Schlichting (Münster)

Tag der Disputation: Mittwoch, der 08.07.2009

Gewidmet dem Andenken an

Rainer Hermann † 2000

Physiklehrer an der Heinrich-Pattberg-Realschule Moers

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	9
2. Das Experiment in der Physik	13
2.1. Wissenschaftstheorie	13
2.2. Naturwissenschaftliche Arbeitsweisen	14
2.2.1. Naturwissenschaftliche Theorien	15
2.2.2. Die Methodik der Findung von Gesetzhypothesen	15
2.2.3. Das Experiment als Methode der Naturwissenschaften	17
2.2.4. Wissenschaftstheoretische Aspekte des Experimentierens	18
2.2.5. Zusammenfassung der wissenschaftstheoretischen Stellung des Experiments	21
2.3. Experimentieren in der physikalischen Ausbildung	22
2.3.1. Warum Experimentieren?	22
2.3.2. Ziele des Experimentalunterrichts	23
2.3.3. Wirksamkeit des Experimentalunterrichts	24
2.4. Offenes Experimentieren	27
2.5. Was „Experimentieren“ bedeutet	30
2.5.1. Modellbeschreibungen des Experimentierens	30
2.5.2. Experimentelle Strategien	32
2.6. Was in dieser Arbeit unter dem Begriff offenes Experimentieren verstanden wird	33
2.6.1. Das Seminar „Offenes Experimentieren“	36
2.7. Aufgabenstellung der Arbeit	37
3. Phänomene zur Erprobung	39
3.1. Der seltsame Stromkreis	39
3.1.1. Erfahrungen im Seminar	41
3.1.2. Übersicht über die Aspekte des Phänomens	48
3.1.3. Fazit	49
3.2. Die Rollbahn	49
3.2.1. Erfahrungen im Seminar	52
3.2.2. Ergebnisse	56
3.2.3. Übersicht über die Aspekte des Phänomens	57
3.2.4. Fazit	57
3.3. Schwimmende Heftzwecken - Ein Phänomen zur Oberflächenspannung	58
3.3.1. Oberflächenspannung	59
3.3.2. Beschreibung der Oberflächenspannung durch Kräfte	60
3.3.3. Oberflächenspannung und Energie	61
3.3.4. Grenzflächenenergie und Benetzung	62
3.3.5. Heftzwecken und Schutzkappen an der Flüssigkeitsoberfläche	64
3.3.6. Erfahrungen im Seminar	65

3.3.7.	Übersicht über die Aspekte des Phänomens	70
3.3.8.	Zusammenstellung der von mir bereitgehaltenen Materialien	70
3.3.9.	Fazit	71
3.4.	Fazit der Erprobungsversuche	72
4.	Die rotierende (Farb-) Scheibe	73
4.1.	Beschreibung des Phänomens	73
4.2.	Erste Phase eigener Untersuchungen	74
4.2.1.	Komplementäre Farben auf der Scheibe und auf dem Schirm	75
4.2.2.	Die durch Zusammenwirken von Farbscheibe und undurchsichtiger Scheibe entstehenden Farben	78
4.2.3.	Farbentstehung mit einem Beamer als Lichtquelle	81
4.3.	Zweite Phase eigener Untersuchungen	83
4.3.1.	Zweiter quantitativer Ansatz	84
4.3.2.	Blick von der Seite	89
4.3.3.	Beliebige Rotationsfrequenzen	93
4.3.4.	Die Färbung des Randbereichs einer runden Kreisscheibe	95
4.3.5.	Eine auf der einen Seite geschwärzte Scheibe	96
4.4.	Erfahrungen im Seminar	97
4.4.1.	Vorführung des Phänomens	97
4.4.2.	Beobachtungen und Fragestellungen	98
4.4.3.	Aspekte die von den Teilnehmern untersucht wurden	99
4.4.4.	Übersicht über die Aspekte des Phänomens	107
4.4.5.	Zusammenstellung der von mir bereitgehaltenen Materialien	107
4.5.	Fazit	108
5.	Ein Phänomen zum Spannungsbegriff	110
5.1.	Beschreibung des Phänomens	111
5.1.1.	Notwendige Vorkenntnisse	111
5.2.	Eigene Überlegungen	112
5.2.1.	Elektrisches Potential und Definition der elektrischen Spannung	113
5.2.2.	Elektromagnetische Induktion	115
5.2.3.	Spannungsmessung bei Anwesenheit von Induktion	116
5.3.	Eigene Experimente zur Prüfung der Theorie	119
5.3.1.	Flussfreie Messkreise im Experiment	119
5.3.2.	Verschiebung der Abgriffpunkte	119
5.3.3.	Systematische Änderung des magnetischen Flusses im Messkreis	120
5.3.4.	Abschätzung der effektiven magnetischen Flussdichte	121
5.4.	Erfahrungen mit Studierenden und ausgebildeten Lehrern	121
5.4.1.	Das Problem mit den Kabelführungen	122
5.4.2.	Stromstärkemessungen	124
5.4.3.	Die Spannungsteilerhypothese von Studierenden	125
5.4.4.	Bestimmung der induzierten Spannung	126
5.4.5.	Variation der Leiterschleifenfläche	126
5.4.6.	Woher „weiß“ das Voltmeter, über welchen Widerstand es zu messen hat?	128
5.4.7.	Erklärungsversuche	129
5.4.8.	Übersicht über die Aspekte des Phänomens	130

5.4.9. Bereitgehaltene Versuchsmaterialien	130
5.5. Fazit	131

6. Die Magnet-Kugelschleife 133

6.1. Beschreibung des Phänomens	134
6.2. Erste Phase eigener Untersuchungen	134
6.2.1. Woher kommt die „zusätzliche“ Energie?	135
6.2.2. Die Erhaltung des Impulses unter Vernachlässigung der Rollbewegung . .	137
6.3. Erste Erfahrungen mit Lehrern	137
6.4. Zweite Phase eigener Untersuchungen	139
6.4.1. Energetische Beschreibung unter Berücksichtigung der Rollbewegung . .	139
6.4.2. Folgerungen	143
6.4.3. Bestimmung der magnetischen potentiellen Energie	146
6.4.4. Experimentelle Überprüfung der Stoßgleichung	147
6.4.5. Die (neue) Diskussion der Impulserhaltung	149
6.5. Erfahrungen mit Studierenden	152
6.5.1. Vorführung des Phänomens	152
6.5.2. Fragestellungen	152
6.5.3. Untersuchung der Energie- und Impulserhaltung	153
6.5.4. Rollen auf unterschiedlichen Bahnen	157
6.5.5. Wirbelströme	157
6.5.6. Liste der von mir bereitgehaltenen Materialien	158
6.5.7. Übersicht über die Aspekte des Phänomens	159
6.6. Fazit	159

7. Der Blick ins Weinglas 160

7.1. Erste Phase eigener Untersuchungen	162
7.1.1. Untersuchung auffälliger Leuchterscheinungen auf dem Schirm	162
7.1.2. Untersuchung der unteren schmalen Lichtlinie	164
7.1.3. Untersuchung des mittleren Lichthofs	165
7.2. Zweite Phase eigener Untersuchungen	167
7.2.1. Sichtbar machen des Strahlengangs durch das Glas	168
7.2.2. Numerische Simulation des Strahlengangs	170
7.2.3. Diskussion der Ergebnisse der Simulation	173
7.2.4. Gegenüberstellung von Simulation und Experiment	175
7.2.5. Die mittlere Lichtlinie bei Rotwein- und Weissweingläsern	175
7.2.6. Der farbige Lichtbogen	177
7.3. Einsatz des Phänomens im Seminar	177
7.3.1. Beobachtungen	177
7.3.2. Fragestellungen	179
7.3.3. Beobachtungen und Untersuchungen	180
7.3.4. Farbaufspaltung der Lichtlinie	185
7.3.5. „Erklärungsansätze“	188
7.3.6. Bereitgehaltene Materialien	189
7.3.7. Übersicht über die Aspekte des Phänomens	189
7.4. Fazit	190

8. Abbildungen mit einer CD-Scheibe	192
8.1. Das Phänomen	192
8.2. Untersuchung des Phänomens	194
8.2.1. Die CD als Fresnel-Linse	194
8.2.2. Beobachtungen unter monochromatischem Licht	195
8.2.3. Die CD als Zonenplatte	196
8.2.4. Der Aufbau einer beschreibbaren CD	196
8.2.5. Die CD als konzentrisches Beugungsgitter	198
8.2.6. Die CD als lichtbrechendes Medium	203
8.2.7. Simulation des Ringleuchtenbildes	209
8.3. Oberflächenuntersuchung des CD-Rohlings	210
8.4. Fazit	212
9. Zusammenfassung und Ausblick	215
9.1. Offenes Experimentieren: Erfolgsrezept oder Fehlschlag?	218
9.2. Ausblick	219
A. Zum Spannungsbegriff	221
A.1. Bezugspfeile	221
A.1.1. Die elektrische Stromstärke	221
A.1.2. Der magnetische Fluss	221
A.1.3. Die elektrische Spannung	222
A.1.4. Die Messspannung eines Voltmeters bei Abwesenheit von Induktion . . .	222
A.2. Das Ohm'sche Gesetz	222
A.3. Die zeitliche Änderung des Magnetfeldes und seine Richtung	223
A.4. Induktion in einer runden Leiterschleife	223
Literatur	225

Einführung

Alle mit Physikausbildung Befassten sind sich über die überragende Rolle einig, die das Experiment, bzw. das Experimentieren sowohl in der Forschung, als auch in der physikalischen Ausbildung bzw. dem Physikunterricht besitzt. Die Frage, wie Rolle, Status und Funktion des Experiments in der physikalischen Ausbildung formuliert und weiterentwickelt werden können, ist seit langem Gegenstand fachdidaktischer Forschung. Leider berichten Autoren aktueller Arbeiten immer wieder von einer Diskrepanz zwischen dem „Wunsch“ und der „Wirklichkeit“. In realen Unterrichtssituationen dominiert an vielen Stellen immer noch die so genannte „Kreidephysik“. Der Unterricht ist methodisch sehr eng geführt und zeigt sich insbesondere auf Fakten- und Formelwissen hin ausgerichtet.

Im angelsächsischen Raum wurde die Problematik der großen Diskrepanz zwischen Zielen und Wirksamkeit des Experimentalunterrichts bereits vor rund zwanzig Jahren erkannt und ausgiebig diskutiert. Obwohl eine Diskussion bei uns in dieser Form nicht stattfand, gaben die Ergebnisse dieser Arbeiten hierzulande Anlässe zum Nachdenken, Überdenken und Reformieren des experimentell ausgerichteten Unterrichts. Einige Arbeiten setzten sich zum Ziel, die Effektivität physikalischer Praktika zu erfassen und/oder zu verbessern. Dabei stellte sich heraus, dass bei traditionell geführten physikalischen Praktika weder die von Fachwissenschaftlern, noch die von Studierenden definierten Lernziele erreicht werden. Einer der größten Kritikpunkte ist die Tatsache, dass die Lernenden beim Experimentieren praktisch nicht selbständig agieren.

Studierende erwerben nicht die im Forschungsalltag benötigten Kenntnisse, wie die Diskussion und Überprüfung eigener Hypothesen, sondern folgen bei der Arbeit im Praktikum „rezeptartig“ vorgegebenen Arbeitsabläufen [42].

Um diese Situation zu verbessern, muss demnach (unter anderem) mehr Selbständigkeit beim Experimentieren seitens der Lernenden erreicht werden. In diesem Zusammenhang traten ausgehend von den schockierenden Ergebnissen der TIMMS- und PISA-Studien zwei weitere Begriffe in den Vordergrund der fachdidaktischen Diskussion: „naturwissenschaftliche Arbeitsweisen“ und „Natur der Naturwissenschaften“ [58]. Es wurden Forderungen laut, dass neben deklarativem Wissen auch (mehr) naturwissenschaftlich-methodisches Wissen vermittelt werden muss. Spätestens seit Bekanntgabe von Ergebnissen einschlägiger aktueller Studien wissen wir, dass

Lernende kaum eine Vorstellungen von der „Natur der Naturwissenschaften“ besitzen. Eine neue Diskussion über die Rolle des Experiments in Forschung und Ausbildung, sowie über das Verhältnis von Empirie und Theorie im Zusammenhang mit naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen wurde entfacht. Lernende sollen im Rahmen ihrer physikalischen Ausbildung nicht nur experimentieren lernen, sondern sie sollen *naturwissenschaftlich experimentieren* lernen. Auch wenn dieses Wort an dieser Stelle nicht näher spezifiziert werden soll, ist wahrscheinlich sofort einzusehen, dass eine „rezeptartige“ Experimentierweise nicht als naturwissenschaftlich bezeichnet werden kann. Im Rahmen ihrer Ausbildung sollen Lernende in einer Art und Weise experimentieren, dass (siehe auch [41, 30, 83]):

1. eine möglichst selbständige und praxisorientierte Auseinandersetzung mit dem Thema gewährleistet ist,
2. die Lernenden zum Artikulieren der eigenen Meinung, Bewusstmachen eigener Vorstellungen und dem Erleben und Bewerten der Vorstellungen anderer angeregt werden,
3. dabei dem Experiment nicht lediglich überprüfende Funktionen zugeschrieben werden, sondern auch
4. dem Experiment ein kreativer Charakter als eine wichtige Eigenschaft verliehen wird und
5. beim Experimentieren die affektive Komponente berücksichtigt wird. Das Experiment soll für die Lernenden motivierend sein und Spaß machen.

Aber wie sieht ein Experiment, oder sogar eine entsprechende experimentelle Lernumgebung, welche diesen Punkten genügt, in der Praxis aus? Ein herkömmliches „Demonstrationsexperiment“, wie es im Unterricht vielfach vom Lehrer benutzt wird, um einen bestimmten physikalischen Zusammenhang didaktisch verständlich darzustellen, scheidet von vornherein aus. Selbst die meisten „Schülerexperimente“ unterscheiden sich in ihrer Konzeption nur wenig von einem Demonstrationsexperiment, außer dass sie von den Lernenden selbst durchgeführt werden.

Während des Experimentierens verfolgen sie ein bestimmtes (vom Lehrer festgelegtes) Ziel, welches am Ende der Stunde erreicht werden soll/muss, und die Mittel und Wege zum Erreichen dieses Ziels werden ihnen (in der Regel) vom Lehrer streng vorgegeben. Ob die Tätigkeiten der Lernenden dabei z.B. von „Selbständigkeit“, „Kreativität“ oder dem „Artikulieren der eigenen Meinung“ geprägt ist, kann zumindest angezweifelt werden.

Ein Experiment, welches den oben genannten Punkten entspricht, muss Freiräume lassen für eigene Beobachtungen und die Formulierung eigener Fragestellungen bzw. Untersuchungsziele, sowie die Möglichkeit bieten, diesen Fragen bzw. Zielen mit eigenen Untersuchungsmethoden nachzugehen. Ein wesentlicher Punkt dabei ist, dass der Lehrende dabei alle von den Lernenden formulierten Ziele zulässt, und zwar auch dann, wenn sie nicht seinen eigenen Zielen entsprechen. Ich würde deshalb den oben genannten Punkten noch drei weitere hinzufügen. Die Lernenden sollen in einer Weise experimentieren, dass:

6. ihre physikalische Beobachtungsgabe herausgefordert wird. Viele (interessante) Aspekte sind nicht auf den ersten Blick erkennbar.
7. sie eigene Fragestellungen und Untersuchungsziele formulieren und diesen durch die Entwicklung experimenteller Strategien nachgehen, und insbesondere dass

-
8. alle ihre Untersuchungsziele vom Lehrenden als gleichwertig betrachtet und zugelassen werden. Es existiert somit kein übergeordnetes Ziel des Lehrenden.

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, sollen die Lernenden durch geeignete Ausgangssituationen zu experimentellen Tätigkeiten angeregt werden. Aus meiner Sicht eignen sich dafür so genannte „Ausgangsphänome“. Dabei kann es sich entweder um ein natürliches oder um ein künstlich hergestelltes Phänomen in Form eines möglichst „interessanten Experiments“¹ handeln, welches den Teilnehmern vom Lehrenden vorgeführt wird. Ausgehend von diesem Phänomen sollen die Lernenden dann eigene Fragestellungen und Ziele entwickeln, Beobachtungen anstellen und Untersuchungen durchführen. Das Ziel soll dabei nicht die Findung einer bestimmten physikalischen Erklärung des Phänomens sein, sondern es besteht vielmehr der Wunsch, dass durch Beobachtungen oder Untersuchungen immer wieder neue Fragestellungen gefunden oder entwickelt werden, an die der Lehrende bisher vielleicht selbst nicht gedacht hat. Aus diesem Grund besteht das Ziel dieser Arbeit darin, geeignete Ausgangsphänomene für eine solche „offene Experimentierweise“ zu finden und zu erforschen. Diese Erforschung beginnt mit der Untersuchung des theoretischen und experimentellen Umfeldes der Phänomene:

- Erschließung des theoretischen Umfeldes:
 - a) Welche physikalischen Aspekte lassen sich an diesen Phänomenen beobachten und untersuchen?
 - b) Welche fachlichen Inhalte stehen im Zusammenhang mit den verschiedenen Aspekten und wie hängen sie zusammen?
- Erschließung des experimentellen Umfeldes:
 - a) Welche Untersuchungen mit welchen Methoden könnte man anstellen, um Erkenntnisse über die Aspekte des Phänomens zu erlangen?
 - b) Welche Experimentiermaterialien können von den Lernenden im Laufe ihrer Untersuchungen anfordern? Welche fordern sie an?
 - c) Welche Fragestellungen und Untersuchungsziele könnten Lernende formulieren? Welche formulieren sie tatsächlich?
 - d) Zu welchen Schlussfolgerungen kommen sie dabei? und
 - e) Welche Hilfestellungen kann bzw. darf der Lehrende geben, ohne die Fragen und Ziele der Lernenden dabei in eine vorbestimmte Richtung zu lenken?

Um Lernende in Form einer beratenden Funktion bei ihren „naturwissenschaftlichen Untersuchungen“ angemessen zur Seite zu stehen, muss der Lehrende zunächst selbst Kenntnisse über das theoretische und experimentelle Umfeld des Ausgangsphänomens erlangen. Dadurch ist er in der Lage, die Beobachtungen der Lernenden einzuordnen, zu interpretieren und möglicherweise auch zu bewerten. Außerdem muss er im Vorfeld auf mögliche Fragen und experimentelle Untersuchungen der Lernenden vorbereitet sein. Die Sammlung muss mit *dem* Experimentiermaterial versorgt sein, auf das die Lernenden zurückgreifen *möchten*, und der Lehrende muss eine Vorvorstellung über mögliche Untersuchungsziele der Lernenden und mögliche experimentelle Schwierigkeiten besitzen.

¹Dies kann eine erklärungsbedürftige Situation z.B. in Form eines kognitiven Konflikts, oder ein besonders ästhetischer Vorgang sein.

In der ersten Phase untersuche ich möglichst viele beobachtbare Aspekte des Ausgangsphänomens. Dabei sollen die „Ursachen“ der beobachtbaren Aspekte aus physikalischer Sicht erarbeitet werden. Da diese Untersuchungen in der Regel experimentell erfolgen, ergeben sich dadurch auch Kenntnisse über das experimentelle Umfeld. Danach erfolgt in der zweiten Phase eine erste Erprobung mit Studierenden, um erste Antworten auf die oben formulierten Punkte zu erhalten. Dabei geht es nicht darum, allgemein gültige Aussagen zu erhalten, vielmehr sollen sich die Ausgangsphänomene in einer ersten Praxis-Phase für ihren Einsatz in einem offenen Experimentierseminar bewähren. Um positiv auf den Experimentalunterricht einwirken zu können muss eine entsprechend offene „naturwissenschaftliche Experimentierweise“ einerseits an Studierende und andererseits auch an ausgebildete Lehrer herangetragen werden. Deshalb soll unabhängig vom Seminar der Studierenden eine Gruppe ausgebildeter Lehrer ebenfalls mit diesen Ausgangsphänomenen experimentieren.

Nachdem im Kapitel 2 ein theoretischer Rahmen um die Rolle des Experiments in der Physik und in der physikalischen Ausbildung gezogen wurde, folgt in Kapitel 3 eine Darstellung der ersten Erprobungsversuche. Dabei handelt es sich um drei Ausgangsphänomene, die im Vorfeld bereits ausführlich von anderen Autoren diskutiert wurden. Mit ihnen konnte ich erste wertvolle Erfahrungen bei der Durchführung offener Experimentiersituationen mit Studierenden sammeln. Daran schließen sich meine Untersuchungen von fünf Ausgangsphänomenen mit der Darstellung der Erfahrungen an, die ich in einem experimentellen Seminar mit Studierenden gemacht habe.

Das erste Phänomen kommt aus dem Bereich der Optik. Eine mit weißem Licht beleuchtete, schnell um ihre Längstachse rotierende weiße Scheibe erzeugt auf einem Schirm einen farbigen Schatten. Darüber hinaus leuchtet die rotierende Scheibe für den Beobachter in verschiedenen Farben.

Das zweite Ausgangsphänomen aus dem Bereich der Elektrik besteht aus zwei Spannungsmessgeräten, die in einem einfachen Stromkreis angeschlossen sind. Obwohl beide Spannungsmessgeräte an den selben Punkten innerhalb der Schaltung angeschlossen sind, zeigen sie unterschiedliche Messwerte.

Bei der Vorführung des dritten Phänomens aus der Mechanik scheint der Energieerhaltungssatz nicht mehr gültig zu sein. Eine in einem waagrecht liegenden Messing-U-Profil rollende Stahlkugel stößt gegen eine aus identischen Kugeln bestehende ruhende Kugelskette. Dabei löst sich nach dem Stoß die letzte Kugel der Kette im Vergleich mit der einlaufenden Kugel mit deutlich größerer Geschwindigkeit von der Kette ab.

Ein Blick in ein gefülltes Weinglas kann einem Beobachter eine Vielzahl optischer Erscheinungen offenbaren. Daher besteht das vierte Ausgangsphänomen aus einem mit Wasser gefüllten Weinglas, welches von einer Lampe beleuchtet wird.

Eine durchsichtige CD-Scheibe, wie sie in manchen Rohlingspindeln als Kratzschutz dient, hat offenbar ähnliche Eigenschaften wie eine Sammellinse. Bei Beleuchtung der CD mit einer Lampe entsteht nicht nur ein Brennpunkt, es sind sogar Abbildungen komplexer Objekte auf einem Schirm möglich, wenn die CD-Scheibe beispielsweise vor einen schattenwerfenden Gegenstand gehalten wird.

Nach ausgiebigen Diskussionen der einzelnen Phänomene folgt im letzten Kapitel eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf offene Fragestellungen für wünschenswerte weitergehende Untersuchungen.

Das Experiment in der Physik

In diesem Kapitel wollen wir uns mit der Thematik des Experiments und des Experimentierens beschäftigen. Dabei stehen Fragen nach der Bedeutung und Effektivität des Experimentierens im Vordergrund. Um Antworten darauf zu erhalten, muss die aktuelle Forschungssituation dargelegt und kritisch geprüft werden. Im Vorfeld sind zunächst einige Begriffe zu klären, zu denen zum Beispiel uns so allgegenwärtige Begriffe wie „wissenschaftliche Arbeitsweise“ oder „wissenschaftliches Vorgehen“ gehören.

Jedes Experiment ist eine Frage an die Natur, auf welche zu antworten sie gezwungen wird. Aber jede Frage enthält ein verstecktes Urteil a priori; jedes Experiment, das Experiment ist, ist Prophezeiung; das Experimentieren selbst ein Hervorbringen der Erscheinungen [72].

2.1. Wissenschaftstheorie

Wir befassen uns nun mit den Aufgaben und Zielsetzungen der Wissenschaften, um eine Vorstellung über „die Natur der Naturwissenschaften“ zu bekommen. Die Aufgaben und Ziele werden durch die Wissenschaftstheorie definiert. Hier werden diese erkenntnistheoretischen Ziele zunächst allgemein und unabhängig von der wissenschaftlichen Disziplin formuliert.

Das oberste Erkenntnisziel der Wissenschaft besteht in der Findung von möglichst wahren und gehaltvollen Aussagen, Gesetzen oder Theorien, über einen bestimmten Gegenstandsbereich [79].

Aus dieser obersten Zielvorstellung definiert Schurz [79] vier methodologische Merkmale aller Wissenschaften:

1. Wissenschaft sucht nach möglichst allgemeinen und gehaltvollen hypothetischen Sätzen, die in einer wissenschaftlichen Sprache abgefasst sind.
2. Wissenschaft sucht nach möglichst vielen Beobachtungsansätzen, welche die Resultate von Beobachtungen, Experimenten oder Messungen wiedergeben.

3. Wissenschaft versucht, mithilfe der allgemeinen und hypothetischen Sätze die zum gegenwärtigen Zeitpunkt bekannten aktuellen Beobachtungssätze zu erklären, sowie neue Beobachtungssätze vorher zusagen.
4. Wissenschaft versucht, ihre allgemeinen und hypothetischen Sätze empirisch zu überprüfen, und zwar indem die vorausgesagten Beobachtungssätze mit den gegenwärtig bekannten aktuellen Beobachtungssätzen verglichen werden.

Bei dieser Methodik sind Erklärungs- und Vorhersageverfahren von besonderer Bedeutung, da für die Findung von gehaltvollen Aussagen erfolgreiche Vorhersagen und Erklärungen wichtig sind.

Um Ordnung in das Gebäude der Wissenschaften zu bringen, werden sie in verschiedene Disziplinen eingeteilt. Diese Einteilung kann auf prinzipiell zwei Wegen erfolgen. Zum Einen durch die Einteilung nach ihrem Gegenstandsgebiet und zum Anderen durch Klassifikation ihres empirischen Charakters. Eine Einteilung nach ihrem Gegenstandsgebiet führt zu den Naturwissenschaften (Physik, Biologie, Chemie...), Technikwissenschaften (Maschinenbau, Elektrotechnik...), der Wissenschaft vom Menschen (Psychologie) oder der Gesellschaft (Soziologie). Die Einteilung nach dem empirischen Charakter ist deutlich allgemeiner:

1. Die *empirischen Wissenschaften*, die durch Suchen, Sammeln und Auswerten empirischer Daten ihre Aussagen und Ergebnisse gewinnen. Dabei spielt es keine Rolle, wie diese Daten gewonnen werden, ob durch Beobachtungen oder Laborexperimente. Fast alle Wissenschaften lassen sich unter diesem Punkt einordnen. Ausnahmen bilden die spekulierenden Wissenschaften (Esoterik, Mystik).
2. Die *experimentellen Wissenschaften*, welche eine Untergruppe der empirischen Wissenschaften sind, beziehen ihre Aussagen und Ergebnisse aus kontrolliert eingesetzten Experimenten. Es werden keine Verhaltensbeobachtungen (Felduntersuchungen) gemacht. Dabei liegt die besondere Betonung auf dem Begriff „kontrollierte Experimente“, in denen bestimmte Bedingungen und Parameter bewusst und gezielt gewählt werden. Da man bei Verhaltensbeobachtungen auf zufällig auftretende Einstellungen von Parametern hoffen muss, können experimentelle Wissenschaften schneller und effektiver arbeiten.

2.2. Naturwissenschaftliche Arbeitsweisen

Aktuelle Bildungsstandards [43] für die naturwissenschaftlichen Fächer fordern von den Lernenden ein Grundverständnis „naturwissenschaftlicher Arbeitsweisen“. In diesem Zusammenhang werden insbesondere Begriffe wie *Wahrnehmen, Ordnen und Erklären, Überprüfen und Modelle Bilden* genannt, Begriffe, die neben vielen weiteren Fähigkeiten dem Experimentalunterricht als erklärtes Ziel zugrunde liegen.

Das Ziel einer naturwissenschaftlichen Bildung ist es, Phänomene erfahrbar zu machen. [...] Dazu gehört das theorie- und hypothesengerichtete naturwissenschaftliche Arbeiten, das eine analytische und rationale Betrachtung der Welt ermöglicht. Eingebettet in den Prozess physikalischer Erkenntnisgewinnung sind das Experimentieren und das Entwickeln von Fragestellungen wesentliche Bestandteile physikalischen Arbeitens. [43].

Spätestens an dieser Stelle werden folgende Fragen relevant. Was bedeutet eine „naturwissenschaftliche Arbeitsweise“ in der Praxis oder: Was hat man unter diesem Begriff überhaupt zu verstehen?

2.2.1. Naturwissenschaftliche Theorien

Aus der Sicht der Wissenschaftstheorie ist eine Definition und Beschreibung der naturwissenschaftlichen Arbeitsweise nicht unproblematisch, da sie sich in vielen verschiedenen Tätigkeiten äußern kann [58]. Darüber hinaus unterscheiden sich die Ansichten von Experten teilweise deutlich voneinander. So herrschten bis weit in das letzte Jahrhundert hinein Annahmen über die naturwissenschaftlichen Methoden, die sich als nicht zutreffend erwiesen haben [91]. Es herrschte lange Zeit die Annahme, dass physikalische Erkenntnisse durch induktive Methoden gewonnen werden. Bei einer induktiven Schlussfolgerung werden Aussagen von einem Spezialfall auf die Allgemeinheit übertragen. Bei induktiven Schlussfolgerungen werden aus konkreten Messergebnissen allgemein gültige Aussagen geschlossen. Beispielsweise folgt das ohmsche Gesetz für Metalle bei einer induktiven Schlussweise aus der Tatsache, dass die Spannung dem Strom bei einem bestimmten Draht proportional ist. Im Gegensatz dazu gibt es die deduktive Methode, bei der aus der Allgemeinheit Schlussfolgerungen auf einen Spezialfall geschlossen werden. Wissenschaftstheoretiker wie Popper, Lakatos und Kuhn konnten zeigen, dass die induktive Erkenntnisgewinnung in der Physik als generelle Beschreibung nicht zutrifft. Die Gewinnung von Erkenntnis ist nach Kuhn vielfach geprägt von Paradigmen- und Methodenwechseln. Für Popper [66] war ein wichtiges Kriterium für eine naturwissenschaftliche Tätigkeit die Falsifizierbarkeit.

Wissenschaftliche Theorien sind nicht verifizierbar, aber sie müssen falsifizierbar sein. Wenn sie nur einmal falsifiziert werden, dann werden sie als falsch ausgeschieden [79].

Naturwissenschaftliche Theorien werden jedoch so gut wie niemals aufgrund einer einzigen Falsifikation verworfen. Erst wenn sich die Hinweise häufen, dass eine Theorie falsch sein könnte und mehrere aktuelle Beobachtungen oder Messungen dies bestätigen, gilt eine Theorie als falsifiziert.

Eine Theorieversion ist falsifiziert, wenn einige aus ihr deduktiv folgenden Phänomene durch aktuelle Beobachtungssätze falsifiziert wurden. Normalerweise führt dies zur Konstruktion einer neuen Theorie [79].

2.2.2. Die Methodik der Findung von Gesetzhypothesen

Als eine Hypothese bezeichnet man eine Aussage, deren Gültigkeit bloß vermutet wird, die aber begründet werden kann. Eine Gesetzhypothese muss darüber hinaus neben der vermuteten Wahrheit auch die so genannte *Relevanzbedingung* erfüllen. Das bedeutet, dass die einer Konsequenz vorangehenden Parameter (Antecedensfaktoren) für das Eintreten dieser Konsequenz im strikten Fall notwendig und im statistischen Fall wahrscheinlich sind [79]. Wir betrachten den strikten Fall und fragen, wie man beim Experimentieren zu einer strikten Gesetzhypothese gelangt. Bei der Prüfung einer solchen Hypothese wird zunächst eine Prüfung auf vermutli-

che Wahrheit und dann eine Prüfung auf Relevanz durchgeführt. Ich erläutere diese Schritte zunächst allgemein und dann kurz an zwei konkreten Experimentierbeispielen. Der Experimentator beobachtet an einem System S_1 einen Effekt mit einer noch nicht bekannten Ursache, die bestimmten Umständen zu Grunde liegt. Er sucht zunächst ein Kontrollsystem S_2 , an dem dieser Effekt ebenfalls beobachtet wird, und listet die dort vertretenen Umstände auf. Im nächsten Schritt stellt er eine erste Hypothese H_1 auf in der Form: „Umstand A ist für den Effekt verantwortlich weil...“ Jetzt gibt es prinzipiell drei Möglichkeiten:

1. Falls im System S_2 der Umstand A ebenfalls vertreten ist, sucht der Experimentator einen weiteren Umstand B (Hypothese H_2) und wiederholt den Prozess.
2. Ist der Umstand nicht vertreten, so wird geprüft, ob oder inwieweit ein Unterdrücken des Umstandes den Effekt zum Verschwinden bringt. Dann gilt die Hypothese als „Relevant“ bestätigt.
3. Eine Änderung des Umstandes A hat in beiden Systemen keine Auswirkung auf den Effekt, d.h. er ist nicht relevant. In diesem Fall sucht der Experimentator einen weiteren Umstand B (Hypothese H_2) und wiederholt die oben genannten Schritte.

Da diese Prinzipien, wenn sie allgemein formuliert werden, nur schwer zu durchdringen sind, diskutiere ich sie an zwei Beispielen. Es handelt sich dabei um zwei kurze Auszüge aus den Experimenten „Blick ins Weinglas“ (Kapitel 7) und „Abbildungen mit einer CD-Scheibe“ (Kapitel 8).

2.2.2.1. Der Farbbogen beim „Blick ins Weinglas“ (Abschnitt 7.2.6)

Beim „Blick ins Weinglas“ beobachtet man einen deutlichen Farbbogen im oberen Bereich des Bildes. Was ist die Ursache für diesen Farbbogen? Meine Hypothese dazu lautete (nach langer experimenteller Tätigkeit): „Die Dicke des Glases ist für diesen Effekt verantwortlich“. Es wurde ein Kontrollsystem in Form eines zweiten Weinglases hinzugezogen, welches aber im Vergleich zum ersten eine viel dünnere Glaswand hat. Dieses Glas zeigt den Effekt nicht. Damit ist die Ursache als relevant bestätigt.

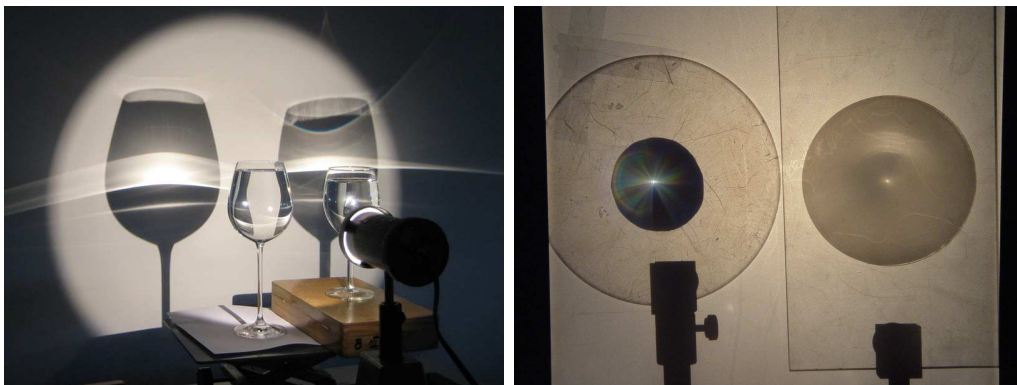


Abbildung 2.1.: **Links:** Beim „Blick ins Weinglas“ erkennt man je nach Glasdicke Farbeffekte auf dem Schirm. **Rechts:** Eine durchsichtige CD und eine Kratzscheibe zeigen dasselbe optische Verhalten auf einem Schirm (rechts).

2.2.2.2. Lichtbeugung- oder brechung an einer CD-Scheibe (Abschnitt 8.2.5.2)

Bei der Untersuchung des Phänomens beobachtet man einen hellen Lichtpunkt in der Mitte eines Schirms hinter der transparenten CD. Wie kommt dieser helle Punkt zu Stande? Meine erste Hypothese lautet: „Beugung am Gitter ist für die Entstehung des hellen Punktes verantwortlich“. Es wurde ein Kontrollsystem geschaffen, in diesem Fall ein Computerprogramm, welches die gleichen mathematischen Umstände (im Sinne der Beugungstheorie) aufzeigt, wie die reale CD. Leider waren die Effekte bei der Simulation nicht in der gleichen Weise wie bei der CD zu beobachten. Ein Indiz dafür, dass die Hypothese falsch ist. Ich führte noch ein zweites Experiment mit einer kreisrund angeschliffenen Kratzscheibe durch, indem ich die CD und die Kratzscheibe gleichzeitig mit einer Lichtquelle beleuchtete. Beide zeigen dasselbe Verhalten, es entsteht ein Punkt auf dem Schirm. Die Kratzscheibe kann aber aufgrund der großen Rillen kein Beugungsverhalten zeigen. Daraus lässt sich sicher folgern, dass Beugung als Ursache ausgeschlossen werden muss. Die Hypothese H_1 wurde sicher widerlegt.

2.2.3. Das Experiment als Methode der Naturwissenschaften

Das Experiment im Sinne einer „Methodik der Naturwissenschaften“ geriet in der wissenschaftstheoretischen Forschung seit etwa Mitte der 80er Jahre mehr und mehr in den Vordergrund (z.B. [31, 28]). Der Grund war, dass zunehmend ein Bewusstsein für die Theoriebeladenheit der Wissenschaftsgeschichte aufkam [28]. Damit verbunden waren wissenschaftstheoretische Arbeiten (seit 1990), die sich deutlich mehr auf handlungsbezogene Komponenten des Experiments bezogen. Dieses neu aufgekommene Interesse wird auch als „new experimentalism“ bezeichnet.

Das Experimentieren wird zu einem vielschichtigen, offenen Prozess, der vom Explorieren neuer Phänomenbereiche, allmähliche Stabilisierung der phänomenologischen Ebene, der Herausbildung von Laborroutinen, dem tastenden Konstruieren erster Interpretationsmöglichkeiten bis hin zur Einbettung in komplexe Theorien reicht [31].

Obwohl auch in der Schule der Stellenwert des Experiments relativ hoch ist, dominiert dort trotzdem eher ein theorie- und streng regelgeleitetes Bild der Physik [41]. Dies hat zur Folge, dass bei Schülerinnen und Schülern eher ein verzerrtes Bild der „Methodik der Naturwissenschaften“ vorherrscht [59, 1]. Die Vorstellungen darüber müssen als unzureichend und nicht adäquat bezeichnet werden [38]. Um über die „Methodik der Naturwissenschaften“ und über „theorie- und hypothesengerichtetes naturwissenschaftliches Arbeiten“ eine angemessene Vorstellung zu erlangen, spielt das physikalische Experiment eine wichtige Rolle. Allerdings bleibt dabei zu bemerken, dass dem Experiment in der Schule eine prinzipiell andere Rolle zugeteilt wird, als in der Forschung. Während das Experiment in der Forschung als ein Teil der naturwissenschaftlichen Methodik zu bezeichnen ist, dient das Experiment in der Schule in der Regel als Medium zur Darstellung von physikalischen Phänomenen. Das Experiment wird oft als streng geführtes Schülerexperiment oder als Demonstrationsexperiment eingesetzt [86]. Ein Einblick in die Forschungspraxis wird durch herkömmliche Schulexperimente nicht gewährt. Hinzu kommt, dass diese Situation von den Lehrmittelherstellern eher noch unterstützt wird, da die Experimentiermaterialien meist nur ganz bestimmten, streng eingegrenzten Anwendungsmöglichkeiten vorbehalten sind. Die wesentlichen Kritikpunkte [39] an die Lehrmittelhersteller sind, dass die Versuchsinstrumente:

1. bereits von vornherein für einen vorgegebenen Zweck ausgelegt und präpariert sind,
2. so konstruiert sind, dass sich physikalische Phänomene nicht (mehr) überlagern,
3. Phänomene zuverlässig und schnell herstellen, ohne dass dieser Herstellungsprozess in Frage gestellt werden muss oder kann,
4. nicht zu Unsicherheiten auf Seiten der Schüler führen können.

Darüber hinaus nennt Höttecke einige Punkte, mit denen sich das Experimentieren im Sinne des „new experimentalism“ klassifizieren lässt.

- **Das Verhältnis zwischen Theorie und Experiment:** Das Verhältnis zwischen Theorie und Experiment ist je nach Stadium einem ständigen Wechsel unterworfen. Experimente können zum einen zur Theoriebildung anregen und eine Theorie kann zu (neuen) Experimenten und Messmethoden anregen.
- **Experimentieren als Handlung:** Experimentieren ist eine handlungsbezogene und nicht nur beobachtende Tätigkeit. Dies stellt auch Tetens [87] fest. Diese Handlungen äußern sich durch Eingreifen in die Natur durch Herstellung, Variation und Präparation von Phänomenen. Dies gilt insbesondere dann, wenn sich mehrere Phänomene überlagern (wie es in der Natur häufig vorkommt).
- **Experimentelle Strategien:** Bei seiner Arbeit verfolgt der Experimentator verschiedene experimentelle Strategien. Je mehr Strategien er kennt und benutzen kann, desto effektiver wird seine Tätigkeit bei der Überprüfung von Hypothesen und der Gewinnung von Erkenntnissen sein. Beispiele für experimentelle Strategien findet man im Kapitel 2.5.2.
- **Experimentelle Fertigkeiten und Scheitern von Experimenten:** Das vorläufige Scheitern von Experimenten gehört insbesondere in der Forschung zum Alltag. Der Experimentator entwickelt mit fortschreitender Erfahrung experimentelle Fertigkeiten¹, wie Messtechniken oder Heuristiken mit dem Ziel, ein Scheitern von Experimenten zu verhindern.

2.2.4. Wissenschaftstheoretische Aspekte des Experimentierens

Die Vorstellungen vom Experimentieren sind in der modernen Gesellschaft eher uneinheitlich und verwaschen. Es besteht auch hier ein eher theoriegeleitetes Bild. So weist Hacking [28] darauf hin, dass in der Gesellschaft überwiegend experimentell arbeitende Wissenschaftler wie Robert Hooke im Vergleich zu Theorie geleiteten Wissenschaftlern nur wenig bekannt sind. Ein häufig vorkommendes Vorurteil ist, dass der Theorie ein höherer Stellenwert eingeräumt wird, als dem Experiment. Carl Popper beispielsweise vertritt diese Ansicht:

Der Theoretiker ist es, der dem Experimentator den Weg weist. Und dessen Arbeit ist nicht so sehr die „exakte Beobachtung“, sondern wieder theoretische Überlegungen. Diese beherrschen

¹Darunter verstehe ich Fertigkeiten wie: Phänomene isolieren, verschiedene Strategien verfolgen oder (Mess)Fehler minimieren.

die experimentelle Arbeit von der Planung des Versuches bis zu den letzten Handgriffen [66].

Liebid [54] behauptet, dass ein Experiment nur dann sinnvoll sei, wenn damit eine Theorie über die jeweils zu untersuchenden Phänomene bestätigt oder widerlegt werden kann. Viele Ideen und Theorien entstehen oder entwickeln sich aber gerade erst durch das Experimentieren. Eine Idee liegt, in welcher Form auch immer, jeder Untersuchungstätigkeit zu Grunde. Die Entwicklung der Optik im 17. Jahrhundert wurde im wesentlichen dadurch initiiert, dass bestimmte Phänomene zufällig beobachtet wurden. Zu diesem Zeitpunkt lagen Theorien überhaupt nicht vor. Allerdings leistet die alleinige Beobachtung eines Phänomens in vielen Fällen noch nichts zum Erkenntnisgewinnungsprozess. Viele beobachtete Phänomene müssen ausgeklammert werden oder „vernachlässigt“ werden, da sie mit dem Untersuchungsgegenstand nicht zusammenhängen.

Thomas Samuel Kuhn war Wissenschaftstheoretiker und Physiker. Vermutlich liegt hier eine Ursache dafür, dass er sich ausführlich mit wissenschaftstheoretischen Betrachtungsweisen des Experiments in der Physik beschäftigte [52]. Nach Kuhn vermitteln Lehrbücher der Physik ein eher missverständliches Bild über die Rolle des Experiments in der Physik. Die tatsächliche Funktion geht nur aus Artikeln in einschlägigen Fachzeitschriften hervor. Der entscheidende Punkt ist, dass bei Publikationen in Fachzeitschriften im Allgemeinen noch keine abgeschlossene Theorie vorliegt. Nach Kuhn übernimmt das Experiment hauptsächlich eine *Bestätigende Funktion*, wobei noch genau definiert werden muss, was unter einer Bestätigung zu verstehen ist. Es werden experimentell gefundene Daten und theoretisch berechnete Daten gegenübergestellt. In diesem Sinne dienen die experimentellen Daten der Prüfung der Theorie. Diese gilt als bestätigt, wenn beide Datensätze übereinstimmen. Bei genauer Betrachtung muss man jedoch feststellen, dass sie aufgrund von realen Bedingungen niemals übereinstimmen.

Die Wissenschaftler suchen also in Zahlentabellen gewöhnlich gar keine Übereinstimmung, sondern etwas, dass sie „vernünftige Übereinstimmung“ nennen. [...] Aus den Tabellen lernt der Leser, was er von der Theorie zu erwarten hat. Die Kenntnis der Tabellen macht einen wesentlichen Teil der Theorie selbst. Ohne die Tabellen wäre die Theorie wesentlich unvollständig. [52].

Im Gegensatz dazu zeigen neue Arbeiten, dass Annahmen über das theoriegeleitete Experimentieren (zumindest in Einzelfällen) falsch ist. Steinle setzte sich kritisch mit den Arbeiten von André-Marie Ampère auseinander und konnte zeigen, dass die Arbeiten Ampères von ausgeprägten Phasen des explorativen Experimentierens geprägt sind, in denen völlig neue Begriffe gebildet wurden, wie beispielsweise der des „Stromkreises“ [81].

In Lehrbüchern der Physik dient das Experiment stets der Bestätigung und Veranschaulichung einer Theorie. In der Forschung dagegen dient es darüber hinaus auch der Suche nach neuen Theorien. Es gibt demnach:

1. Die *bestätigende Funktion* des Experiments zur Überprüfung und Verdeutlichung von bereits bekannten Theorien, und
2. die *explorative Funktion* des Experiments zur Erschließung neuer Erkenntnisse und neuer Theorien.

Schreibt man dem Experiment eine bestätigende Funktion zu, so wird durch qualitative oder quantitative Untersuchungen eine bereits vorhandene Theorie im Sinne einer „vernünftigen

Übereinstimmung“ bestätigt oder widerlegt. In manchen Fällen werden dabei auch gänzlich neue Theorien gefunden.

Der überwiegende Teil der Tätigkeit ist eine komplizierte und aufwendige Aufräumarbeit, die das dem letzten theoretischen Durchbruch zu verdankende Neuland kultiviert und wesentliche Voraussetzungen für den nächsten wissenschaftlichen Durchbruch schafft [52].

Diese grundsätzlich unterschiedlichen Aspekte finden sich auch im Experimentalunterricht wieder. Robinson [69] bezeichnet diese beiden Philosophien als „traditional“ oder „cookbook-approach“ und den so genannten „experimental-approach“. Eine weitere Differenzierung erfolgt durch eine Beschreibung der Tätigkeit. Kuhn gibt in diesem Zusammenhang dem Begriff „Messung“ eine besondere Bedeutung. Wir sprechen von einer **quantitativen Messung** genau dann, wenn die Auswertung der Ergebnisse stets eindeutige Zahlen oder Daten liefert. Experimente, die diese Eigenschaft nicht besitzen, nennen wir **qualitativ**. Eine Messung setzt, wenn sie von einer sinnvollen Fragestellung ausgeht, immer eine gewisse Systematik voraus. Das bedeutet jedoch nicht, dass qualitative Messungen nicht systematisch sein können. Aus diesem Grund ist die Systematik kein Indiz, das der eindeutigen Unterscheidung beider Tätigkeiten dient. Sie ist aber ein wichtiger Hinweis. Obwohl qualitative Experimente keine eindeutigen Zahlenwerte liefern, ist ihnen dennoch eine ebenso große Bedeutung in der Wissenschaft zuzuschreiben, wie den quantitativen Messverfahren. Im Gegenteil: Quantitatives Experimentieren ist eine überaus wichtige Voraussetzung für sinnvolle, quantitative Untersuchungen. Die experimentelle Tätigkeit kann auch nach den Motiven aufgeschlüsselt werden.

1. *Normalwissenschaftliches Experimentieren*: Suche nach neuen quantitativen Gesetzen, oder die Bestätigung von bereits bekannten Gesetzmäßigkeiten zur Überprüfung von Konsistenzen.
2. *Experimentieren aufgrund einer Krisensituation*: Untersuchungen einer Anomalie z.B. durch Variation von Parametern, um reproduzierbare Daten bzw. Informationen über diese Anomalie zu erhalten.

Diese Unterscheidung ist sehr wichtig. Eine Krisensituation tritt dann auf, wenn sich z.B. die experimentell gewonnenen Ergebnisse nicht mit dem theoretischen Wissen im Einklang bringen lassen. Wenn diese Diskrepanzen nicht ihre Ursachen in der Messtechnik haben, so ist eine besondere Form der Tätigkeit notwendig. Der Experimentator „probiert dann erst mal alles aus“:

An diesem Punkt wird der Wissenschaftler sehr viel mehr als an jedem anderen anfangen, aufs Geratewohl zu suchen und alles auszuprobieren, was nach seiner Auffassung möglicherweise eine Aufklärung über die Natur seiner Schwierigkeit liefern könnte. Hält dieser lange an, so möge er sich fragen, ob nicht der gesamte Ansatz auf diesem jetzt problematischen Gebiet der Naturerscheinungen irgendwie schief sein könnte [52].

Im Forschungsalltag treten diese Situationen relativ häufig auf, sie werden aber bei Publikationen nicht erwähnt. Der Experimentator bemüht sich dann beispielsweise, durch die gezielte Änderung von einzelnen Parametern eine Anomalie herauszuarbeiten. Die Tätigkeit umfasst in der ersten Stufe die Suche und Präparation von Phänomenen und in der zweiten Stufe die Gewinnung von reproduzierbaren Ergebnissen. In gewissen Situationen führen die Ergebnisse

von Experimenten nicht zu einer Bestätigung von Theorien. In diesem Fall muss sicher gestellt werden, dass es sich nicht um systematische Abweichungen durch reale Bedingungen handelt. Können diese Ursachen ausgeschlossen werden, und ist die Abweichung so groß, dass eine Beschreibung durch eine Theorie im Sinne einer vernünftigen Übereinstimmung nicht möglich ist, so setzt eine andere Forschungsaktivität ein, die Kuhn außerordentliches Experimentieren nennt. Solche Experimente entstehen in vielen Fällen aus Situationen, in denen die vorliegenden Ergebnisse zumindest teilweise nicht verstanden werden. Der Experimentator versucht, durch eine gezielte Änderung von Parametern, diese Anomalie weiter herauszuarbeiten. In manchen Fällen lässt sich eine solche Anomalie durch exaktere Messmethoden verstehen, in anderen Fällen wird sie aber auch erst durch eine neue Theorie verstanden. Bemerkenswert ist, dass eine Vielzahl von bedeutenden, wissenschaftlichen Entdeckungen erst durch eine solche Anomalie möglich wurden.

2.2.5. Zusammenfassung der wissenschaftstheoretischen Stellung des Experiments

Im vorangegangenen Abschnitt wurden einige Positionen zur Rolle des Experiments diskutiert, die wir im Folgenden kurz zusammenfassen wollen.

Wissenschaftstheoretiker wie Kuhn sehen in der Rolle des Experiments im Wesentlichen die Bestätigung oder Widerlegung von Theorien. Demzufolge muss einem Experiment immer eine Theorie vorangehen. Aus der Theorie ergeben sich Vorhersagen, die unter entsprechenden experimentellen Bedingungen eintreten müssten. Ist dies der Fall, so gilt die Theorie als bestätigt, ansonsten als widerlegt². Man spricht hier auch von einer hypothetisch-deduktiven Methodik. Bei dieser Sichtweise werden aber auch leider viele wichtige Aspekte des Experimentierens wie z.B. Kreativität, Hypothesen- und Theorienentstehung einfach ausgeblendet. Newton oder Francis Bacon dagegen sahen die Rolle des Experiments im Wesentlichen in der Erzeugung von Theorien. Dem Experiment wird also ein wissensgenerierender und schöpferischer Charakter zugeschrieben, der von Induktivismus geprägt ist.

Demnach sollten:

1. dem Experiment nicht lediglich überprüfende Funktionen zugeschrieben werden, denn dabei geht der kreative Charakter des Experiments als eine wichtige Eigenschaft verloren.
2. Experimente auch nicht als ein übergeordnetes Mittel zur Beweisführung angesehen werden. Dies gilt sowohl für die induktive, als auch für die deduktive Methode.
3. die kreativen Aspekte des Experimentierens angemessen berücksichtigt werden, denn: *Das Entstehen der „richtigen“ Ideen hängt viel stärker vom richtigen Experimentieren ab, als Liebig es wahrhaben wollte [30].*
4. auf der anderen Seite Experimente auch nicht als Methode zur Findung von Gesetzen oder Theorien verstanden werden (starker Induktivismus).

Die „wahre“ Funktion des Experiments in der Physik beinhaltet demnach Aspekte aller oben genannten Punkte und lässt sich nicht einfach durch eine einzelne Theorie beschreiben und

²In der Praxis gilt dieser Satz nicht so pauschal. Erst wenn mehrere Indizien für oder gegen eine Theorie sprechen, gilt diese als bestätigt oder widerlegt.

dies wird in der Fachliteratur (z.B. [15, 31, 58]) insbesondere im Rahmen des “new experimentalism“ deutlich. Dabei werden Elemente aus allen Sichtweisen bezüglich des Experiments relevant. Oder: um es mit den Worten von Heidelberger zu formulieren:

Es scheint also, daß keine der genannten Theorien des Experiments wirklich befriedigen kann. Gefragt ist eine Position, die gewissermaßen in der Mitte zwischen den genannten Extremen liegt: Dem Experimentieren muss neben seiner kritischen auch eine schöpferische Seite zugestanden werden, aber auf eine Weise, die den starken Induktivismus vermeidet [30].

2.3. Experimentieren in der physikalischen Ausbildung

Das Berufsbild von Physikern ist in Forschungs- und Entwicklungstätigkeit in einem hohen Maße von Kreativität und Neugier geprägt. In den entsprechenden Unterrichtsfächern wird jedoch eher ein anderes Bild vermittelt. Es zeichnet sich ein negativer Trend im Bereich Motivation und des Gesamtbildes der Naturwissenschaften ab. Die traditionelle Ausrichtung des Physikunterrichts ist dabei die Ursache vieler Probleme.

Der naturwissenschaftliche Fachunterricht in Deutschland ist traditionell sehr stark stofflich-systematisch orientiert. Er ist methodisch eng geführt mit einem starken Fokus auf Fakten und Formelwissen [19].

2.3.1. Warum Experimentieren?

Warum soll überhaupt im Physikunterricht experimentiert werden? Diese Frage ist didaktisch sehr grundsätzlich und keineswegs trivial zu beantworten. Es müssen bei dieser Diskussion Einflüsse aus verschiedenen Wissenschaftsgebieten berücksichtigt werden. Dazu gehören pädagogische, psychologische, fachliche und erkenntnistheoretische Argumente. Die Argumentation hängt sehr stark vom Standpunkt der jeweiligen Autoren ab. Aus pädagogischer Sicht tragen beispielsweise Schülerexperimente zur Selbständigkeit der Lernenden bei und erhöhen die Fingerfertigkeit [89]. Aus psychologischer Sicht können sie die (Lern-) Motivation steigern. Durch einen kognitiven Konflikt lässt sich dies zumindest kurzfristig in der Anfangsphase erreichen [49]. Aus fachlicher und erkenntnistheoretischer Sicht ist das Experiment die „Frage an die Natur“. Experimentalpraktika sollen deshalb nicht nur der Aneignung von Theorie dienen, sondern insbesondere praktische Fertigkeiten und ein Gefühl für eine wissenschaftliche Arbeitsweise vermitteln [62, 50]. Die wissenschaftliche Arbeitsweise bezeichnet Kirschner als „academic problem solving“. Diese vereint in sich Begriffe wie: Beobachten und Untersuchen, Erkennen und Definieren eines Problems, sowie Kreativität in Suchen und Auswählen von Lösungsstrategien. Ein weiterer Punkt bezieht sich auf die Vorstellung von Lernenden über die Bedeutung und Natur der Naturwissenschaften. So zeigt eine aktuelle Studie von Höttecke und Reiß [41], dass bei den Vorstellungen über die Natur der Naturwissenschaften Aufklärungsbedarf herrscht. So werden beispielsweise Forschungsprozesse nicht für kreativ gehalten und die Naturwissenschaften gelten als regelgeleitet. Selbst in einem entsprechenden Studium kann eine angemessene Vorstellung nicht vermittelt werden.

Der Einfluss von Kultur und Gesellschaft auf die Natur der Naturwissenschaften wird zwar eingesehen, aber nur bis zu einer bestimmten Grenze, jenseits derer das eigentliche Denken und Handeln in den Naturwissenschaften als autonom betrachtet wird [41].

Höttecke und Reiß schlagen auch Ansätze zur Verbesserung der Situation in Bezug auf die Lehrerbildung vor, indem sie einzelne Seminarsituationen bewerten. Situationen sind lernwirksam, wenn sie:

1. zu einer möglichst selbstständigen und praxisorientierten Auseinandersetzung mit dem Thema führen,
2. zum Artikulieren der eigenen Meinung, zum Bewusstmachen eigener Vorstellungen und dem Erleben und Bewerten der Vorstellungen anderer führen.

In diesem Zusammenhang spielt das Experiment eine wichtige Rolle, und der hohe Stellenwert in der physikalischen Ausbildung lässt sich unter anderem damit begründen. Der nächste Schritt wäre darüber nachzudenken, in welcher Form das Experiment in der physikalischen Ausbildung eingesetzt werden soll. Es zeigt sich, dass unterschiedliche Experimentierformen verschiedene Arten von Problemen mit sich bringen.

2.3.2. Ziele des Experimentalunterrichts

In der Universitätsausbildung wird der Experimentalunterricht in Form von Praktika durchgeführt, über deren Ziele weitgehend Einigkeit herrscht. Diese wurden in der Vergangenheit in zahlreichen Untersuchungen wie von Boud [9], Welzel [95], Toothacker [88], Woolnough [97] oder Ruickoldt [71] erhoben. Welzel führte dabei im Rahmen eines europaweiten Forschungsprojektes „Labwork in science education“ eine Befragung von Lehrenden in sechs europäischen Ländern durch. Die Studie bestand aus insgesamt drei Teilen (Stufen), wobei zunächst die Ziele der Lehrenden in einem offen gehaltenen Fragebogen (Pilotstudie) erfasst, und die Antworten kategorisiert wurden. Als Ergebnis ergeben sich die folgenden Ziele:

Beim Experimentieren sollen:

1. Lernende Theorie und Praxis miteinander verbinden.
2. Lernende experimentelle Fähigkeiten erwerben.
3. Lernende Methoden wissenschaftlichen Denkens kennenlernen.
4. Lernende motiviert werden, ihre Persönlichkeiten und ihre sozialen Kompetenzen weiterzuentwickeln.
5. Lehrende die Möglichkeit haben, das Wissen der Lernenden zu überprüfen.

Die Entwicklung von experimentellen Fähigkeiten wurde bereits 1983 von Woolnough [97] gefordert. Er definiert dabei drei wesentliche Erkenntnisziele. Diese sind Übung im Umgang mit Geräten, experimentelle Fertigkeiten (im Sinne von Kreativität bei forschenden Tätigkeiten) und praktische Erfahrungswerte. Woolnough [97] und Toothacker [88] nennen folgende Hauptziele physikalischer Praktika:

1. Experimental activity in support of lecture.
2. Experimental activity to develop a scientific way of working, in using experience and understanding to solve open-ending problems which can be developed through practical investigations and projects.
3. Experimental activity for learning laboratory skills, techniques and familiarity with equipment.
4. Experimental activity to obtain a feel for various phenomena.

Toothacker bezieht sich bei seinen Schlussfolgerungen auf Ergebnisse anderer Autoren. Darin sollen Praktika Vorlesungen begleiten und unterstützen, sowie praktische Fertigkeiten vermitteln. Woolnough nennt explizit als Ziel die Entwicklung von Vorstellungen über eine naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweise. Vergleicht man diese Ziele mit denen von Welzel, so kann der erste und der letzte Punkt in die Kategorien „Theorie und Praxis verbinden“ und „Experimentelle Fähigkeiten erwerben“ eingeordnet werden. In diesem Sinne stellt die Studie von Welzel die aktuelle Zielsetzung umfassend dar. Insgesamt wird mehr Selbständigkeit seitens der Lernenden gefordert, die in offeneren Formen des Praktikums oder durch Projekte erzielt werden kann. In den meisten Fällen werden die Ziele in der Literatur im kognitiven Bereich der Lernenden festgemacht. Der affektive Bereich, der stark von Emotionen, Haltung und Einstellung zum Experiment geprägt ist bleibt weitgehend unberücksichtigt. Dieser Umstand wurde bereits 2002 von Suhr [83] kritisiert. Es existiert eine Motivationskluft, die sich durch die Diskrepanz zwischen starrer Übungsversuche auf der einen Seite und realen Forschungssituationen auf der anderen Seite begründen lässt. Nach Ruickold [71] werden aus diesem Grund insgesamt weniger, dafür aber intensiver zu bearbeitende Experimente gefordert, die deutlicher auf Selbständigkeit und Eigeninitiative der Lernenden hin ausgelegt sind. Suhr weist darauf hin, dass die Lernform des offenen Praktikums affektive Lernprozesse fördert und begründet dies durch ein entsprechendes Engagement der Lernenden.

2.3.3. Wirksamkeit des Experimentalunterrichts

Insbesondere in der englischsprachigen Literatur wird die Rolle des Experiments in der physikalischen Ausbildung deutlich kritischer gesehen. Es zeigt sich dort in verschiedenen Untersuchungen, dass viele der gesteckten Ziele aus Kapitel 2.3.2 nicht oder nur unzureichend erreicht werden. Nach Lunetta [55], der einen Überblick über den derzeitigen Forschungsstand gibt, und Hodson [35] wird der Experimentalunterricht seinen hohen Erwartungen nicht oder zumindest nur teilweise gerecht, da Lernende z.B. durch kochrezeptartige Vorgehensweisen zu „Handwerkern“ erzogen werden.

Students tended to perceive either following the instructions or getting the right answer as the principal purpose for a school science task. They often fail to understand the relationship between the purpose of the investigation and the design of the experiment they had conducted. To many students a lab means manipulating equipment but not manipulating ideas [55]. [...] For many children what goes on in the laboratory contributes little to their learning about science. Nor does it engage them in doing science. [35]

Zu ähnlichen Aussagen kommt auch Moreira [61] in einer Studie zur Evaluation von Laborunterricht. Er kritisiert in seiner Untersuchung die Tatsache, dass der Lernerfolg des Laborunterrichts stets nur an den Ergebnissen gemessen wird, zu denen die Lernenden gekommen sind. Bei dieser engen Sichtweise werden viele wichtige Aspekte des Experimentierens vernachlässigt. Daher sollte der Schwerpunkt der Untersuchung darin liegen, folgende Fertigkeiten der Lernenden zu erfassen:

1. Gewinnung von Fragestellungen (What was/were the basic questions that you tried to answer by performing the experiment.),
2. Identifizierung von physikalischen Konzepten, die in das Experiment involviert sind (What key concepts of elektromagnetism (in this case) were involved in the formulation of such questions?),
3. Erkennung von wesentlichen Phänomenen (What basic phenomenon(a) was/were involved?),
4. Beschreibung der Methoden um die Fragestellungen zu beantworten (What method did you use to answer the basic questions that you investigated?),
5. Vortragen der Ergebnisse (What results did you get?).

Zur Beantwortung dieser Fragen müssen sich die Probanden den Erkenntnisgewinnungsprozess beim Experimentieren bewusst machen. Moreira betont, dass er in seiner Untersuchung nicht rezeptartiges und offenes Experimentieren vergleichen will. Die Experimente unterscheiden sich nur durch die Versuchsanleitungen. Die Resultate der Untersuchung klingen enttäuschend. Es fällt den Lernenden schwer eigene Fragestellungen zu gewinnen, wobei dies von den durchgeführten Experimenten abhängig ist. Eine zweite Aussage erweist sich als noch ernüchternder: „Die Lernenden wissen nicht, was sie beim Experimentieren tun. Sie erkennen physikalische Kernkonzepte eines Experiments nicht.“ Daher gehen sie mit Phasen des „wissenschaftlichen Arbeitens“ sehr locker um. Darüber hinaus sehen sie die experimentelle Tätigkeit nur als ein „Hantieren mit Laborgeräten“ [55]. Es wird nicht erkannt, dass Experimentieren eine Erkenntnistätigkeit ist, in der Wissen gebildet und aufeinander bezogen wird.

The result of this study suggest, that in many cases, students perform an experiment without a clear idea about what they are doing or about what “lies behind“ an experiment. Many Students are not able to identify the physical concepts, the basic phenomena, and even the basic question involved in the Experiment. [61]

Untersuchungen wie diese zeigen, dass der Experimentalunterricht an vielen Stellen Defizite aufweist und demnach neue Ideen und Konzepte für seine Realisierung in der physikalischen Ausbildung nötig sind. Hucke [42] untersuchte ausgehend von dieser Situation empirisch den Lernerfolg eines traditionellen Anfängerpraktikums. Dabei zeigte er im Einklang mit der bestehenden Kritik, dass Praktika ihren hohen Ansprüchen nicht gerecht werden, da Ziele wie „Theorie und Praxis verbinden“ nicht erreicht werden. Gleichzeitig macht er auch einige Verbesserungsvorschläge wie:

1. Das Einschränken von Handlungsangeboten, die nicht förderlich für physikalisch-theoriegeleitetes Handeln sind. Dadurch soll z.B. durch den Einsatz von Modellbildungssystemen vermieden werden, dass die Lernenden sich ausschließlich auf einer niedrigen Handlungsebene bewegen und sich ausschließlich mit handwerklichen Tätigkeiten beschäftigen.
2. Eine offenere Gestaltung des Praktikums. Die einzelnen Arbeitsschritte sollen nicht mehr explizit in der Versuchsanleitung vorgegeben sein. Dies steht im Einklang mit den Wünschen von Studierenden [71]. Gleichbedeutend ist die Forderung nach mehr Selbstständigkeit und Eigeninitiative. Dabei muss ein Mittelweg zwischen Offenheit und Anleitung gefunden werden, damit die Praktikumsarbeit nicht zum größten Teil dazu verwendet wird, technische Probleme zu lösen.

Darüber hinaus gibt es weitere wichtige Punkte, die an dieser Stelle nur kurz genannt werden:

3. Der Einsatz von Modellbildungssystemen.
4. Eine gezielte und intensive Betreuung.
5. Die Berücksichtigung affektiver Variablen.

Der Experimentalunterricht lässt sich in verschiedene Bereiche einteilen [69, 50]. Zum Einen die traditionelle, streng geführte Form von Experimentalpraktika (academic approach, cookbook approach), in denen die Experimente einen kochrezeptartigen Ablauf haben, und zum Anderen die „offene“ Methode (project approach, divergent/open ended lab), in der Studierende selbständig Experimente erarbeiten und durchführen müssen. Die „offene Methode“ ist hauptsächlich auf das Erlernen von Selbständigkeit und einer „Wissenschaftlichen Arbeitsweise“ hin ausgelegt. Einer der Hauptkritikpunkte des in der Praxis am häufigsten vorkommenden, streng geführten Praktikumsansatzes ist, dass dabei aus didaktischer Sicht Kenntnisse von und über naturwissenschaftliche Arbeitsweisen nicht vermittelt werden können. Darüber hinaus wird den Lernenden an vielen Stellen die Notwendigkeit eines Experiments nicht deutlich. „Warum soll ich ein Experiment wiederholen, welches vor mir schon viele andere durchgeführt haben.“

Kein (vernünftiger) Wissenschaftler würde heutzutage auf die Idee kommen, ein Experiment eines anderen Wissenschaftlers zu wiederholen, wenn das Ergebnis mit seinen Vorhersagen übereinstimmt oder das Ergebnis allgemein akzeptiert ist. Ausnahme: Er will sich besondere Fähigkeiten und Fertigkeiten aneignen oder dem anderen einen Fehler nachweisen [68].

Zwar finden heutzutage in der physikalischen Ausbildung an vielen Stellen Experimente Verwendung, und ihre Bedeutung für den Unterricht wird an vielen Stellen hervorgehoben, im Unterrichtsalltag dominieren jedoch streng geführte oder Demonstrations-Experimente.

In der Unterrichtspraxis dominieren die stark geführten Experimente. Die dabei vorherrschende „kochrezeptartige“ Vorgehensweise vermittelt den Schülern implizit oder explizit ein unzulängliches induktives Wissenschaftsbild. [...] Die Funktion der Experimente beschränkt sich vor allem auf das Vorstellen und Veranschaulichen. Schüler haben kaum Gelegenheit bei der Formulierung von Hypothesen sowie bei der Planung und Auswertung selbst aktiv zu werden [19].

Hofstein und Lunetta [36] verweisen in diesem Zusammenhang auf das konstruktivistische Lernmodell, bei dem davon ausgegangen wird, dass Wissen von den Lernenden auf der Basis eigener Erfahrungen selbst konstruiert werden muss und sich nicht einfach weitergeben lässt [49]. Dadurch wird „Das Lernen“ zu einem aktiven und iterativen Prozess. Für den Laborunterricht bedeutet das, die Selbstständigkeit der Lernenden durch forschungsähnliche Prozesse (investigative experiences) zu fördern und so die Entwicklung eigener Konzepte zu ermöglichen. Mit dem traditionellen, streng geführten Ansatz lassen sich solche Forderungen kaum erfüllen. Ausgehend von dieser Problematik untersuchte Gangoli [23] die Effektivität eines „quasi offenen“ Praktikumsansatzes (guided open end approach). Er kommt dabei zu dem Schluss, dass der quasi offene Ansatz dem traditionell geführten Ansatz in Bezug auf kognitive Fähigkeiten wie: „Wissen, verstehen und anwenden“, sowie praktischer Fertigkeiten überlegen ist. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Anders et. al. [2] in einer Untersuchung aus der Chemie. Marshall [57] betont, dass durch eine offene Arbeitsweise das Selbstvertrauen der Lernenden gestärkt werden kann. Dies gilt auch für die schwächeren, da bei einer solchen Arbeitsweise auch „nicht physikalische Aspekte“ wie z.B. handwerkliche Fertigkeiten von großer Bedeutung sein können. Allerdings bedeutet dies nicht, dass sich mit einem offenen Praktikumsansatz alle Probleme lösen lassen. Nur zu experimentieren reicht für die Gewinnung von Kenntnissen von und über naturwissenschaftliche Arbeitsweisen nicht aus. Kenntnisse von und über Naturwissenschaften lassen sich nicht einfach „nur durch Experimentieren“ gewinnen. Vielmehr ist ein gezieltes, überlegtes und angemessenes Eingreifen einer Lehrperson wichtig.

If students understandings are to be changed toward those of accepted science, then intervention and negotiation with an authority, usually a teacher, is essential [36].

Kirschner [50] weist in seinem Artikel explizit auf die Gefahren des so genannten „entdecken- den Lernens“ hin. Eine solche Lernumgebung ist vielfach durch induktive Schlussfolgerungen geprägt, die mit einer naturwissenschaftlichen Sicht- und Arbeitsweise nur wenig gemein haben. Deshalb müssen bei den Lernenden bei einer entdeckenden oder offenen Form des Lernens zunächst angemessene Präkonzepte vorhanden sein.

Discovery presupposes a prior conceptual framework. With discovery one can investigate relationships between concepts, but it does not, with certainty, lead one to new concepts [50].

Eine entdeckende oder offene Lernumgebung kann also dazu dienen, bereits bekannte physikalische Zusammenhänge zu untersuchen und miteinander in Beziehung zu setzen. Sie kann jedoch nicht dazu dienen, neue Konzepte zu entwickeln oder Zusammenhänge zu finden.

2.4. Offenes Experimentieren

Bisher haben wir den Begriff der „Offenheit“ bzw. „Offenes Experimentieren“ in einer sehr allgemeinen Form verwendet und nicht näher präzisiert. In dieser allgemeinen Form lässt sich nach einer Definition von Carter unter dem Begriff „offenes Experimentieren“ verstehen:

Experimentation, in which the student reports in his own manner, draws his own conclusions, makes own predictions, etc [16]

In diesem Kapitel soll eine genauere Betrachtung dieses Begriffes erfolgen. Der Leser wird in der Literatur eine genaue Definition, oder eine eindeutige Festlegung in der Sprache der Didaktik nicht finden [44, 93]. Es gibt sehr grobe Unterscheidungen, wie: „cookbook“ vs. „project or divergent“ Laboratory [20, 26, 69], oder differenzierte Einteilungen z.B. nach Zielen und Tätigkeiten der Lernenden [18].

Um eine eigene Definition des Begriffes „Offenes Experimentieren“ zu entwickeln, ist zunächst eine Klassifizierung von Merkmalen dieser Experimentierweise sinnvoll. Marshall [57] nennt einige weitere wichtige Merkmale einer offenen experimentellen Arbeitsweise.

1. **Die Rolle des Lehrenden:** Der Lehrende sollte in einem offenen Praktikum eine beratende Position einnehmen. Dies ist eine schwierige Rolle, da die Lehrperson einerseits gegebenenfalls geeignete Hilfestellungen geben muss, andererseits durch sein Intervenieren die Offenheit der Situation nicht einschränken darf (siehe auch [36]). Dazu können Einwände in der Form: „Welche Möglichkeiten haben Sie um jetzt weiter vorzugehen?“ oder „Welche experimentellen Untersuchungen wären an dieser Stelle Ihrer Meinung nach sinnvoll?“ dienen. Um die Offenheit der Situation beizubehalten muss der Lehrende die Lernenden leiten, nicht führen (leading, not directing), damit sie eigene Entscheidungen treffen können.
2. **Das Scheitern von Experimenten:** Es sollte hervorgehoben werden, dass es nicht schadet, wenn ein Experiment scheitert oder keine klaren Resultate liefert. Den Lernenden sollte verdeutlicht werden (siehe auch [39]), dass das Scheitern eines Experiments nicht gleichbedeutend ist mit dem Scheitern des Lernenden.
3. **Bereitstellung von Ressourcen:** Offenes Experimentieren bedeutet das Auswählen und Benutzen vorhandener, gegebenenfalls auch das Anfordern nicht vorhandener Materialien. Daher muss die Sammlung auf verschiedene Anforderungen und Wünsche der Lernenden vorbereitet sein.
4. **Dokumentationen:** Die Überlegungen, Berechnungen und insbesondere Messergebnisse sollten in einem festen Buch (Laborbuch) dokumentiert werden. Dadurch wird die Arbeit der Lernenden chronologisch festgehalten, es wird vermieden, dass Ergebnisse verloren gehen und die Aufzeichnungen können als Grundlage für die spätere Auswertung dienen.

In der Literatur unterscheidet man zwischen einer Vielzahl von Experimentierformen wie beispielsweise: angeleiteten (expository), entdeckenden (discovery), problem-orientierten (problem-based) und offenen Ansätzen (open inquiry, open ended) [18, 69, 50, 47, 24]:

Praktikumsstil	Ergebnis/Ziel	Ansatz	Prozedur
Angeleitet	vorbestimmt	deduktiv	Lehrervorgabe
Nachforschung	nicht vorbestimmt	induktiv	Schülervorgabe
Entdeckend	vorbestimmt	induktiv	Lehrervorgabe
Problem-orientiert	vorbestimmt	deduktiv	Schülervorgabe

Domin [18] unterscheidet insbesondere die offenen Formen des Experimentierens in ihren Prozeduren *und* Zielen. Bei angeleitetem Experimentieren (expository) wird die Prozedur und

das Ziel vom Lehrenden fest vorgegeben. Die Form des Nachforschens erlaubt es den Lernenden, eigene Untersuchungsziele zu formulieren und diese auch zu verfolgen. Das „Ziel“ ist dem Lernenden im Vorfeld unbekannt. Bei der entdeckenden (discovery) Variante führen die Lernenden Untersuchungen durch, die ihnen vom Lehrenden (meist ohne theoretische Einweisung) vorgegeben wurden. Dabei sollen sie am Ende selbst Zusammenhänge erkennen und Gesetze formulieren. Bei problemorientierten (problem based) Ansätze werden die Lernenden aufgefordert, sich selbst Experimente zu überlegen, um einen vorgegebenen Sachverhalt zu untersuchen. Dabei haben die Lernenden bereits alle nötigen theoretischen Vorkenntnisse erhalten, die zur Problemlösung nötig sind. Ein Beispiel für einen problemorientierten Ansatz könnte ein Projektpraktikum sein. Bei einem Projektpraktikum liegt ein Schwerpunkt auf der Konzeption von Projekten. Als Rahmenbedingungen werden z.B. verschiedene, physikalische Bereiche angeboten, aus denen die Lernenden auswählen. Die Lernenden schlagen dann selbst geeignete Experimente vor. Darüber hinaus wird ein Laborbuch geführt [57] und es existieren keine Versuchsanleitungen [80]. Die Lernenden werden ermutigt, eigene Projekte zu verfassen und die Beispiele nur als eine Richtschnur zu betrachten. In einem offenen Praktikum wird ebenfalls in einem hohen Maße Wert auf Selbständigkeit gelegt. Allerdings geht man im Vergleich zu einem Projektpraktikum noch einen Schritt weiter, indem ein besonderer Wert auf eine *Konstruktion von Fragestellungen* und das *Herauspräparieren eines Untersuchungsgegenstandes* gelegt wird [67]. Um dies zu ermöglichen, müssen die vorliegenden Rahmenbedingungen von ganz besonderer Art sein. Die Rahmenbedingungen werden zunächst durch die Vorführung eines Einstiegsphänomens in einem gewissen Umfang festgelegt und soll die Lernenden motivieren, eigene physikalische Fragestellungen zu konstruieren und diese dann zu verfolgen. Durch die Vorführung eines Einstiegsphänomens wird zwar ein gewisser Rahmen festgelegt, aber die von diesem Punkt ausgehende experimentelle Tätigkeit ist den Teilnehmern dann freigestellt. Daher stellt die Vorführung eines Einstiegsphänomens keinen unmittelbaren Widerspruch zum Offenheitsbegriff dar.

Leider präsentiert sich der Offenheitsbegriff in der Literatur sehr allgemein. Die explorative Form des Praktikums wird in vielen Fällen prinzipiell als offen bezeichnet. Finegold [20] beschreibt ein zweiteiliges, offenes Experimentalpraktikum, indem Studierende im ersten Teil in die Labortätigkeit eingeführt werden. Im zweiten, offenen Teil wählen sie eigene Experimente aus einem vorgegebenen Bestand aus und/oder sie konstruieren neue Experimente. Dabei handelt es sich um interessante Standardexperimente wie z.B. Josephson Effekt oder ein Mikrowellen Spektrometer.

The basic approach taken was that the course should teach students how to do experimental work in general, in the expectation that there are indeed general principles which can be taught. [...] The boundary conditions were (a) that each experiment be planned for a block of time to encourage students to set their own deadlines [...], and (b) that the students spend at least one week in preparing a flow chart of their expected approach and time schedule [20].

Es wird deutlich, dass sich der Leser beim Studieren dieser Arbeiten ein möglichst exaktes Bild vom Offenheitsverständnis des Autors machen muss. Der Offenheitsbegriff, der im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, ist noch deutlich umfassender. In welchem Umfang leisten Standardexperimente die Konstruktion von eigenen Fragestellung? Können Sie es überhaupt leisten? Dies sind wichtige Fragen, die in vielen Fällen zu wenig diskutiert wurden/werden. Aus diesem Grund werde ich im folgenden Abschnitt das dieser Arbeit zu Grunde liegende

Experimentierverständnis ausführlich beschreiben.

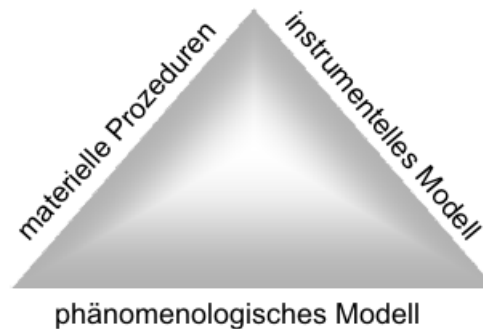


Abbildung 2.2.: Modellbeschreibung des Experimentierens nach Pickering [64]

2.5. Was „Experimentieren“ bedeutet

Es gibt eine Reihe von Ansätzen mit dem Ziel, die Tätigkeit des Experimentierens durch ein Modell zu beschreiben. Da die Ansätze zum Teil grundverschieden sind und die „wahre Beschreibung“ wahrscheinlich Elemente aller Ansätze enthält, seien hier exemplarisch drei Beispiele genannt.

2.5.1. Modellbeschreibungen des Experimentierens

Es gibt Autoren, die dem Experiment einen streng linearen Ablauf zuschreiben (z.B. [49]). Experimentieren wird als ein „Abarbeiten“ einer im Vorfeld feststehenden Checkliste dargestellt:

1. *Problematisieren*: Der Experimentator wird vor ein Problem gestellt, welches es zu lösen gilt. Dieses Problem muss zunächst als solches erkannt werden.
2. *Hypothesenbildung*: Ausgehend von diesem Problem werden Hypothesen generiert, die es zu untersuchen gilt.
3. *Konstruieren einer experimentellen Anordnung*: Diese dient der Untersuchung durch Produzieren von Messdaten.
4. *Laborieren und Deutung*: Die gewonnenen Daten müssen ausgewertet und interpretiert werden.

Die Hauptproblematik bei einer solchen Beschreibung liegt darin, dass einerseits die Dynamik und Vielschichtigkeit des Experimentierprozesses nicht berücksichtigt wird und andererseits kreative Aspekte wie das Verfolgen von Strategien, das Verwerfen von Hypothesen oder ganzen Theorien praktisch völlig ausgeblendet werden. Pickering [64] schlägt deshalb vor, die experimentelle Tätigkeit in drei wesentliche Modell-Elemente einzuteilen. Diese sind *materielle Prozeduren*, das *instrumentelle Modell* und das *phänomenologische Modell*. Die materiellen Prozeduren können auch als handwerkliche Prozeduren bezeichnet werden. Damit sind

Aktionen wie der Aufbau und die Inbetriebnahme einer experimentellen Anordnung oder die Durchführung und Überwachung von Messabläufen gemeint. Das instrumentelle Modell umfasst das Verständnis des Experimentators über die Funktionsweise, aber insbesondere auch über die Grenzen des Versuchsgeräts. Pickering betont die Wichtigkeit des dritten Elements, des phänomenologischen Modells. Physikalische Phänomene werden experimentell erzeugt oder untersucht, weil sie ein Teil unserer Welt sind, über die der Forscher etwas herausfinden möchte. Das phänomenologische Modell repräsentiert deshalb die Konzepte und Vorstellungen über die Zusammenhänge des zu untersuchenden Phänomens mit der umgebenen Welt (Theorie und Theoriebildung). Dadurch wird dem Experimentieren erst eine Bedeutung oder ein Sinn zugesprochen. Es gibt keinen eindeutigen, klar ersichtlichen Zusammenhang dieser drei Punkte, der beim Experimentieren durchlaufen wird. Vielmehr ist dieser dynamische Prozess von einem vielfachen Wechsel und Überlagerungen dieser drei Punkte geprägt. Unstimmigkeiten, Unordnung und auch Unsicherheiten sind bei diesem Prozess keine Seltenheit, und es gehört zur Persönlichkeit des Experimentators dazu, diese Unsicherheiten auszuhalten. In den Momenten, wo Ergebnisse gewonnen werden, stehen die einzelnen Elemente des Modells plötzlich in einem stimmigen Zusammenhang und ergänzen einander sogar. Handwerkliche Prozeduren werden bedeutsamer, wenn sie durch ein instrumentelles Modell begründet werden können und dies führt zu experimentellen Ergebnissen, die Antworten auf Fragen aus dem Umfeld der uns umgebenen Welt liefern.

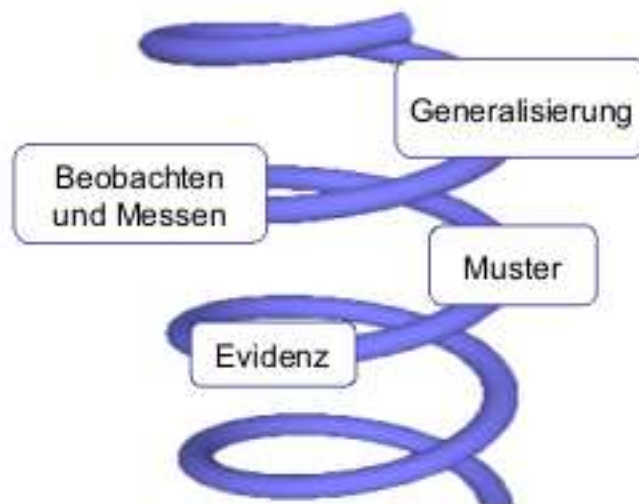


Abbildung 2.3.: Modellbeschreibung des Experimentierens nach Höttecke [40]

Ein anderer, aber ähnlicher Ansatz wird von Höttecke [40] vorgeschlagen. Dabei wird der Experimentierprozess mit einer dreidimensionalen Spirale verglichen. Die Tätigkeit verläuft auf dieser Spirale und äußert sich in verschiedenen Punkten. Dabei ist ein entscheidender Punkt, dass die Spirale keinen eindeutigen Anfangs- und Endpunkt besitzt, da sich Ausgangspunkt, Ziele und Erkenntnisse je nach Experimentiersituation deutlich voneinander unterscheiden und daher keine einheitliche Definition möglich ist. Betrachtet man die Spirale von oben, so erkennt man, dass die einzelnen Punkte zyklisch durchlaufen werden. Dabei tritt der Experimentator jedoch nicht auf der Stelle, sondern es werden Erkenntnisse beim Experimentieren gewonnen. Dies wird durch die vertikale Richtung dargestellt, in der die Spirale nach oben verläuft. Im Laufe

der experimentellen Tätigkeit sucht der Experimentator nach *Mustern*. Dies sind Erscheinungen oder Beobachtungen, die in bestimmten Situationen (immer wieder) auftreten und deren Beobachtung und Suche durch Vorerfahrungen bestimmt sind. Vorhersagen können gemacht werden, wenn die gefundenen Muster *generalisiert* (verallgemeinert) werden. Die Vorhersagen sind in der Regel nicht allgemeingültig. *Beobachtungen und Messungen* werden gemacht, um Daten zu gewinnen. An dieser Stelle ist das instrumentelle Verständniss des Experimentators gefragt (vgl. Pickering [64]). Diese Daten sprechen nicht von vornherein für sich, sondern sie müssen in einer Phase der *Evidenz* ausgewertet und interpretiert werden. Die einzelnen Schritte in diesem Prozess sind grundsätzlich vorläufig, da Theorien und Muster im Laufe der Tätigkeiten neu gedeutet oder Messwerte als Artefakte (manchmal auch umgekehrt) erkannt werden können.

2.5.2. Experimentelle Strategien

Die Arbeit oder Tätigkeit eines Experimentators beim Beobachten, Messen oder Suchen nach Mustern wird von einer Vielzahl *experimenteller Strategien* geleitet. Diese Strategien sind es, die die Kreativität eines Forschungsprozesses ausmachen und ihn zu einem großen Teil bestimmen. Hentschel [31] gibt eine Zusammenstellung solcher experimenteller Strategien, die von anderen Autoren herausgearbeitet wurden. Die Wichtigsten seien an dieser Stelle genannt:

1. Manipulieren des Untersuchungsgegenstandes.

- a) Der Experimentator beeinflusst absichtlich ein (Untersuchungs-)Objekt unter reproduzierbaren Laborbedingungen. Damit gilt das Untersuchungsobjekt als sicher existierend.
- b) Lässt sich der Untersuchungsgegenstand nicht kontrolliert manipulieren oder besteht er trotz Manipulation an den vermeintlich für seine Entstehung wesentlichen Bedingungen weiter, so könnte es sich auch um einen Artefakt handeln.
- c) Eine systematische Variation der Versuchsbedingungen kann auch dann Aufschluss über den Untersuchungsgegenstand mit sich bringen, wenn noch keine weitreichenden Konzepte vorliegen.

2. Isolierung von Phänomenen: Physikalische Phänomene treten meist in der Natur nicht isoliert auf, sondern überlagern einander. Der Experimentator versucht, diese Phänomene voneinander zu entkoppeln. Voraussetzung dafür ist zunächst die Identifizierung und später die kontrollierte Manipulation der einzelnen Phänomene.

3. Überprüfung von Vorhersagen.

- a) Es wird überprüft, ob die Veränderung von Versuchsbedingungen des Untersuchungsgegenstandes mit bestimmten Vorhersagen des Experimentators übereinstimmen. Falls ja, ist dies bereits eine Bestätigung für das Experiment und des zu Grunde liegenden theoretischen Hintergrunds.
- b) Bestätigen sich diese Vorhersagen nicht, so stehen sowohl die Richtigkeit der Hintergrundannahmen als auch der gesamte experimentelle Untersuchungsprozesses in Frage.

4. **Verwenden verschiedener Detektoren bei der Untersuchung.** Spricht einer der Detektoren nicht auf ein Objekt an, obwohl er in anderen Zusammenhängen bei diesem Objekt ansprechen müsste, so kann es sich um ein Artefakt des Detektors handeln. Sprechen alle Detektoren auf ein Objekt an, so deutet dies auf einen „echten Effekt“ hin.
5. **Die Prüfung auf Konsistenz.** Die Daten, die im Experiment A mit einem Detektor gemessen wurden, und die, die im Experiment B mit demselben Detektor gemessen wurden, werden auf Verträglichkeit geprüft.
6. **Verbesserung der experimentellen Anordnung und/oder der Laborbedingungen.** Dazu gehören:
 - a) Minimieren von systematischen Fehlern.
 - b) Trennung des zu untersuchenden Messsignals vom Hintergrundrauschen. Dies kann sich einerseits durch eine Verbesserung des Detektors, andererseits durch eine spitzfindigere Datenauswertung äußern.
7. **Das Ausschließen von alternativen Erklärungen.** Bei der Untersuchung eines Effektes werden verschiedene Bereiche untersucht, bei denen Theorien oder Hypothesen unterschiedliche Aussagen machen.
8. **Steigerung des Vertrauens in einen Effekt,** der von einer Theorie vorhergesagt wird. Dies kann durch unabhängige Experimente oder Erfahrungen erreicht werden. Ebenso wird der Wert einer Theorie gesteigert, wenn Experimente oder Erfahrungen ihre Voraussetzungen bestätigen.

Diese experimentellen Strategien, oder die so genannte prozedurale Ebene des Experimentierens als Teil eines „irrational“ verlaufenden Entdeckungsprozesses, wurde in der Literatur lange Zeit ausgeblendet [31]. Erst in der jüngsten Vergangenheit kam das Interesse und der Blick auf experimentelle Strategien wieder auf. Die Wissenschaftstheoretikerin Darden hat sich im Bereich der Biologie mit der Aufstellung von Forschungsstrategien beschäftigt. Ebenso legt A. Franklin [22] ein großes Gewicht auf experimentelle Strategien.

2.6. Was in dieser Arbeit unter dem Begriff offenes Experimentieren verstanden wird

Wie bereits erwähnt, spielt das Experiment in der physikalischen Ausbildung vielfach in Form eines „darstellenden Mediums“ eine verifizierende oder falsifizierende Rolle. Die explorative Funktion des Experiments wird in den meisten Fällen durch „rezeptartige“ Versuchsabfolgen bereits im Keim erstickt. Im Folgenden lege ich die Eckpunkte für eine in meinem Sinne offene experimentelle Tätigkeit fest. Das erklärte Ziel meiner offenen Experimentierweise ist es, einen Einblick in eine „naturwissenschaftliche Form“ des Experimentierens zu gewähren. Damit ist gemeint, dass den Lernenden ein Gefühl für die Rolle des Experiments in Wissenschaft und Forschung vermittelt werden soll. Bei einer Modellbeschreibung des Experimentes wie sie in Kapitel 2.5.1 diskutiert wird, zeigt sich, dass es sich beim Experimentieren um einen sehr dynamischen Prozess handelt, der durch einen ständigen Wechsel verschiedener Tätigkeiten und auch durch Unsicherheiten und Paradigmenwechsel ausgezeichnet ist.

Offenes Experimentieren in meinem Sinne beginnt mit der Vorführung eines so genannten Ausgangsphänomens. Die Lernenden sollen dazu veranlasst werden, mit Hilfe von eigenen experimentellen Tätigkeiten dieses- oder einzelne Aspekte des Phänomens zu untersuchen. Die dabei verwendeten Mittel, Strategien und Ziele sind den Lernenden völlig freigestellt. Der Lehrende übernimmt dabei die Rolle eines Beraters. Falls die Teilnehmer bei ihren Untersuchungen in eine Sackgasse geraten und nicht mehr weiter wissen, kann der Lehrende durch geeignete Diskussionen, Anregungen oder gegebenenfalls auch Hilfestellungen verhindern, dass die Lernsituation zerfällt.

Offenes Experimentieren folgt somit einer gewissen Struktur, deren Elemente dynamisch in einem ständigem Wechsel durchlaufen werden. Dazu gehört zu Beginn eine Ausgangssituation, eine erklärungsbedürftige Situation, die den Ausgangspunkt für die folgenden Untersuchungen darstellt. Daraus entstehen Tätigkeiten wie Ausprobieren, Spekulieren und systematisches Experimentieren. Diese einzelnen Elemente werden von Phasen unterbrochen, in denen eine interne Reflexion stattfindet. Gemäß Kapitel 2.5.1 lässt sich die Tätigkeit des offenen Experimentierens in Form einer Spirale darstellen. Ausgehend von einem Ausgangsphänomen werden die einzelnen Elemente der Tätigkeit immer wieder durchlaufen. In der „dritten Dimension“ wird dabei der (experimentelle) Erkenntnisgewinn dargestellt. Beim zirkulären Durchlaufen der Elemente wird experimentelle Erkenntnis gewonnen. Die Spirale hat keinen eindeutig definierten Anfangs- und Endpunkt. Trotz gleicher Ausgangssituationen können sich die einsetzenden Tätigkeiten bei verschiedenen Teilnehmern deutlich von einander unterscheiden.

1. **Vorführung eines Ausgangsphänomens:** Das Ausgangsphänomen dient im Wesentlichen zwei Zielen. Zum Einen muss es motivierend genug sein, um daran eigene Untersuchungsziele zu formulieren und zu verfolgen. Zum Anderen muss es Untersuchungen in möglichst viele verschiedene Richtungen ermöglichen. Die Motivation dazu kann entweder durch einen kognitiven Konflikt oder durch eine Diskrepanz zwischen dem Beobachteten und Erwarteten geschaffen werden. Die Motive sollen sich aus einem Bedürfnis das Phänomen zu beschreiben und zu erklären entwickeln. Im Allgemeinen kann dies eine konkrete Aufgabenstellung in dieser Form nicht leisten. Das Erklärungsbedürfnis führt dazu, dass der Lernende beginnt, eigene Untersuchungsziele zu formulieren und diesen nachzugehen. Daher muss das Phänomen in gewisser Weise „interessant“ und „außergewöhnlich“ genug sein, um eine nach kurzer Zeit einsetzende Demotivation zu verhindern.
2. **Die Explorationsphase:** Dieser Teil der Untersuchung stellt eine Vorstufe des systematischen Experimentierens dar. In diesem Zusammenhang sollen sich durch „Ausprobieren“ spätere Untersuchungsziele und Motive herauskristallisieren. Bei dieser Phase handelt es sich auch um ein Brainstorming, an dessen Ende eine Vielzahl an gemachten Beobachtungen und Überlegungen, vor allem aber Fragen und Vermutungen über Erklärungsansätze zum beobachteten Phänomen stehen sollen. Es werden bereits erste Vermutungen, Spekulationen, Überlegungen, manchmal auch erste qualitative Untersuchungen angestellt, die ständig mit dem aktuellen Wissensstand abgeglichen werden. Vorvorstellungen und Hypothesen können auch zu weiteren erklärungsbedürftigen Situationen führen. Somit stellt die Phase des Probierens bereits eine Erkenntnistätigkeit dar und führt zu einer Weiterentwicklung von Kenntnissen. Die Entwicklung und Herauskristallisation von Untersuchungszielen kann für die einzelnen Teilnehmer ganz unterschiedlich verlaufen, da individuelle Beobachtungen beim Kontakt mit dem Phänomen gemacht werden können.

Experimenteller Erkenntnisgewinn

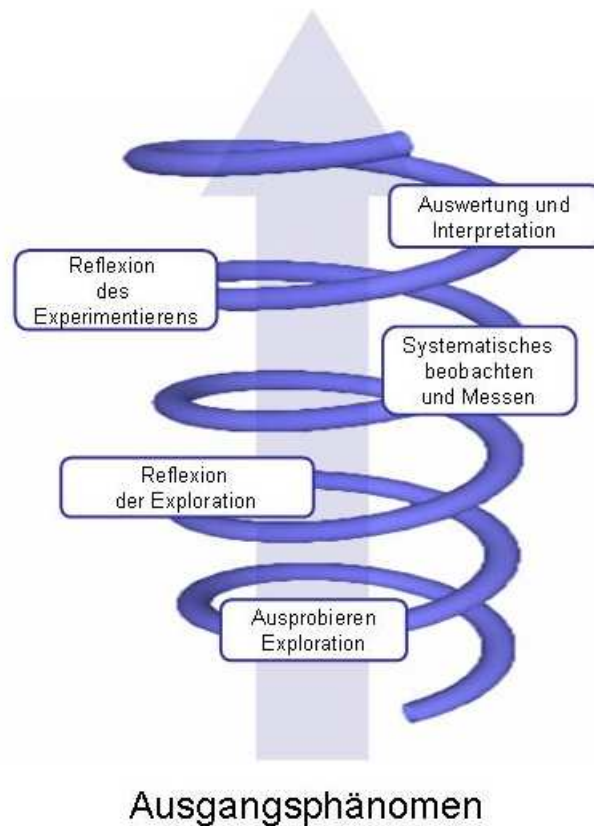


Abbildung 2.4.: Darstellung der Elemente und Ablauf des offenen Experimentierens.

3. **Reflexion der Exploration:** Im Allgemeinen tritt nach einer gewissen Zeit das Bedürfnis nach einer Systematisierung der Beobachtungen und Überlegungen auf. Über die in der Explorationsphase herausgearbeiteten Ziele und Hypothesen herrscht unter den Teilnehmern nicht immer Einigkeit. Die Probierphase ist oft durch individuelle Tätigkeiten geprägt. Ab einem gewissen Punkt entstehen keine weiteren Ideen oder Hypothesen mehr, wodurch das Ausprobieren ineffektiv wird. Es wird eine Systematisierung erforderlich, bei der die Experimentiertätigkeit reflektiert wird und in der die bis zu diesem Punkt gebildeten theoretischen Prinzipien und Hypothesen reflektiert werden. Dadurch wird ein guter und vor allem für alle Teilnehmer gleicher Ausgangspunkt für die folgende systematische Untersuchung geschaffen.
4. **Systematisches Beobachten und Messen:** Der Begriff beinhaltet qualitative, quantitative, normalwissenschaftliche und außerordentliche Experimentiertätigkeiten aufgrund von Krisen (vgl. Kapitel 2.2). Die in den Anfangsphasen gewonnenen Hypothesen, Vermutungen und Beobachtungen werden systematisch experimentell untersucht. Dabei sollten sich in den vorangegangenen Punkten experimentelle Fragestellungen herauskristallisiert haben. Es werden experimentelle Strategien entwickelt (vgl. Kapitel 2.5.2), mit denen Untersuchungsziele verfolgt werden. Alle gemachten Beobachtungen und Überlegungen sollten in einem Laborbuch schriftlich festgehalten werden. Darüber hinaus steht am En-

de jeder Experimentiersitzung ein kurzes Resümee in Form einer Diskussion, in dem die bis dahin gemachten Beobachtungen und Experimente zusammengefasst und Vorschläge für das weitere Vorgehen in kommenden Sitzungen zusammengetragen werden. Die Experimentierphase beinhaltet in einem gewissen Rahmen auch die Auswertung und Interpretation der gewonnenen Daten. Aufgrund der daraus gewonnenen Erkenntnisse können sich neue Untersuchungspfade eröffnen oder neue Hypothesen bilden.

5. **Reflexion des Experimentierens:** Die während der vorangegangenen systematischen Experimentierphase gewonnenen Erkenntnisse sollen in einer weiteren Brainstorming- und Diskussionsrunde reflektiert werden. Insbesondere sollen sich die Lernenden aber auch ihre experimentellen Tätigkeiten bewusst machen. In diese Diskussionen fließen sowohl eigene Motive und Tätigkeiten, als auch die der anderen ein. Dadurch gewinnen die Teilnehmer an Erfahrung. Im Rahmen dieser Orientierungstätigkeit soll das Verständnis über die Zusammenhänge zwischen „Theorie und Praxis“, also zwischen Motiv, Hypothese, und Experiment erarbeitet werden.
6. **Auswertung und Interpretation der Ergebnisse:** Die Auswertung und Interpretation der gesamten experimentellen Tätigkeit erfolgt durch ein Protokoll. Darin sollen nicht nur die durchgeführten systematischen Untersuchungen ausgewertet, sondern insbesondere auch der Weg der Erkenntnis für Aussenstehende nachvollziehbar beschrieben werden. Als Grundlage dienen die Aufzeichnungen im Laborbuch. Die Ausarbeitung hat zum Ziel, dass sich die Lernenden den Weg der experimentellen Erkenntnisgewinnung bewusst machen.

Die einzelnen Strukturelemente des offenen Experimentierens lassen sich in der Praxis nicht so leicht voneinander trennen, wie es hier angedeutet wird. Manchmal laufen einzelne Elemente dieser Phasen sogar parallel ab. Insbesondere bei den Reflexionsphasen kann es von Vorteil sein, wenn sie während der gesamten, experimentellen Tätigkeit im Hintergrund ablaufen. Mit zunehmender Erfahrung wird eine strikte Trennung dieser Phasen immer unbedeutender.

2.6.1. Das Seminar „Offenes Experimentieren“

An dieser Stelle will ich kurz auf das von mir durchgeführte Seminar und auf die bestehenden Randbedingungen eingehen, in dem die Studierenden an den von mir ausgewählten Phänomenen experimentierten. Das Seminar hatte zwei Semesterwochenstunden und bestand im Durchschnitt aus 13 Semesterwochen. Die Teilnehmer arbeiteten in Gruppen zu jeweils drei Personen vier Wochen lang an einem von insgesamt drei Phänomenen. In dieser Zeit fanden sowohl alle Überlegungen und Untersuchungen eines Phänomens statt, als auch die Auswertungen und Reflexionen der eigenen Tätigkeiten in Form eines Protokolls. Jede Gruppe führte ein Laborbuch, indem alle Tätigkeiten, Überlegungen und Ergebnisse des Versuchstages stichpunktartig zusammengefasst wurden. Dieses Laborbuch diente dann auch als Grundlage für das Protokoll. In der letzten Semesterwoche fand eine abschließende Diskussionsrunde mit allen Teilnehmern statt, in der die Gruppen ihre Ideen, Untersuchungsmethoden und auch ihre Ergebnisse den anderen Seminarteilnehmern vorstellten.

2.7. Aufgabenstellung der Arbeit

Ausgehend von der im Kapitel 2.3.3 dargestellten Kritiken an der großen Diskrepanz zwischen Zielen, Inhalten und Wirksamkeit und der Ausrichtung des Experimentalunterrichts in der physikalischen Ausbildung ist das Hauptziel dieser Arbeit das Untersuchen und Sammeln von physikalischen Phänomenen, die eine wie in Kapitel 2.5 beschriebene selbständige und offene Experimentierweise ermöglichen sollen. Wie bereits erwähnt, nimmt die lehrende Person bei einer solchen offenen Experimentierweise eine beratende Position ein. Dabei kann sie den Lernenden mit Tipps und Anregungen zur Seite stehen, die aber nicht die Überlegungen der Lernenden in eine bestimmte Richtung (an die möglicherweise der Lehrende denkt) lenken sollten, und wodurch mögliche Untersuchungsziele oder Fragestellungen der Lernenden beeinflusst werden.

Dabei ist von entscheidender Bedeutung, dass der oder die lehrende Person einerseits über den fachlichen Hintergrund des/der Ausgangsphänomene einen souveränen Überblick besitzt, und andererseits eine gewisse Vorvorstellung hat über mögliche Fragestellungen, sowie Experimentierideen, aber auch über Probleme und „experimentelle Sackgassen“, um auf Fragen und Vorschläge der Lernenden vorbereitet zu sein. Zu diesem Zweck muss der Lehrende

1. möglichst umfassend mit den physikalischen Inhalten des zu Grunde liegenden Phänomens vertraut sein,
2. eine Vorvorstellung über mögliche experimentelle Fragestellungen besitzen, die im Zusammenhang mit dem Ausgangsphänomen auftauchen können,
3. im Idealfall möglichst viele experimentelle Untersuchungen selbst an dem Phänomen angestellt haben und
4. einen Überblick über mögliche (vielleicht auch wahrscheinliche) Experimentiertätigkeiten der Teilnehmer besitzen.

Dadurch ist es möglich zu gewährleisten, dass der Lehrende in angemessener Weise auf die Probleme und Experimentierideen der Teilnehmer eingehen kann. Das Forschungsvorhabens beginnt demnach mit der:

1. *Zusammenstellung von physikalischen Phänomenen für eine offene experimentelle Arbeitsweise und Erarbeitung deren physikalischen und experimentellen Inhalten.*

Bei der Erarbeitung des physikalischen Inhalts erhält man Informationen über die Komplexität eines Phänomens. Deshalb müssen umfassende experimentelle Untersuchungen an dem Ausgangsphänomen durchgeführt werden, um die fachlichen und experimentellen Inhalte genau zu verstehen. Bei diesen Untersuchungen können und werden auch neue Beobachtungen gemacht, die bis dahin unbekannte (manchmal auch komplexe) Aspekte des Phänomens offenbaren. Dies sind Aspekte, an die der Lehrende vorher noch nicht gedacht hat.

2. *Welche Experimente können bei der Untersuchung des Phänomens von den Teilnehmern durchgeführt werden? Welche davon sind sinnvoll und welche nicht. Welche Experimente werden von den Teilnehmern vorgeschlagen, an die die Lehrperson nicht gedacht hat?*

Im abschließenden Teil der Arbeit sollen dann erste Beobachtungen experimenteller Tätigkeiten einzelner Seminarteilnehmer beschrieben und diskutiert werden. Welchen Fragestellungen gehen die Lernenden im Laufe ihrer Untersuchungen nach? Welche sind von Beginn an vorhanden und welche bilden sich neu? Anhand dieser Fragestellung können sich dem Lehrenden ebenfalls Aspekte des Phänomens offenbaren, an die er bis zu diesem Punkt noch nicht gedacht hat.

3. *Welche Fragestellungen und Untersuchungsziele formulieren die Lernenden?*
4. *Welche Experimente werden bei der Untersuchung des Phänomens von den Lernenden durchgeführt? Welche werden nicht durchgeführt?*
5. *Zu welchen Ergebnissen kommen die Lernenden bei ihren Untersuchungen?*

Die Informationen aus allen Punkten zusammen lassen eine erste Beurteilung zu, ob sich ein Phänomen für eine offene Experimentierweise (Kapitel 2.5) eignet. Ein Phänomen eignet sich beispielsweise genau dann, wenn es möglichst vielen der folgenden Punkten entspricht.

- Das Ausgangsphänomen sollte möglichst viele Untersuchungspfade (Aspekte) in unterschiedliche Richtungen eröffnen.
- Das Ausgangsphänomen sollte nicht zu komplex sein, sodass Gefahr besteht, dass sich die Lernenden im Rahmen ihrer Untersuchungen in der Fülle der Möglichkeiten verlieren.
- Die Lernenden sollen durch die vorhandenen Aspekte des Phänomens ausreichend zu eigenen Untersuchungen angeregt werden.
- Das Phänomen muss im Rahmen einer vorgegebenen Zeit von vier Wochen von den Lernenden so bearbeitbar sein, dass sie aus ihrer Sicht zu adäquaten Ergebnissen kommen können.

Phänomene zur Erprobung

Zu Beginn dieser Arbeit beschäftigte ich mich zunächst mit physikalischen Phänomenen, die in der Vergangenheit bereits von anderen Autoren mehr oder weniger umfassend diskutiert wurden. In einem zweistündigen Seminar haben Studierende dann an diesen Phänomenen experimentiert. Dadurch war es mir möglich, erste Erfahrungen darüber zu sammeln, wie Seminarteilnehmer mit einem solchen Phänomen umgehen, welche Überlegungen sie anstellen und welche Untersuchungsmethoden bzw. Experimente sie schließlich planen und durchführen. An dieser Stelle sollen drei von mir ausgewählte „Probephänomene“ vorgestellt werden.

3.1. Der seltsame Stromkreis

Auf dieses Phänomen aus der Elektrik stieß ich zum ersten Mal bei Treitz [90]. Es handelt sich dabei auf den ersten Blick um eine Reihenschaltung zweier Lampen und zweier Schalter gemäß Abb. 3.1. Die Schaltung wird mit einem 6V Wechselspannungs-Netzgerät betrieben. Jeweils eine Lampe und ein Schalter sind rot bzw. grün markiert. Das Besondere an diesem Phänomen besteht nun darin, dass sich die rote und die grüne Lampe mit den entsprechenden Schaltern unabhängig voneinander schalten lassen. Dies sollte bei einer „normalen“ Reihenschaltung nicht möglich sein, da nur in einem vollständig geschlossenem Stromkreis Strom fließen kann.

Demnach sollten die Lampen nur beim Schließen *beider* Schalter leuchten. Da dies offensichtlich nicht für diese Schaltung gilt, scheint sie zunächst den Gesetzen der Reihenschaltung zu widersprechen. Es liegt fast schon auf der Hand, dass Modifikationen in der in Abb. 3.1 dargestellten Schaltung nötig sind, damit sich die Lampen unabhängig voneinander schalten lassen. Durch parallel schalten von Dioden zu den Lampen und zu den Schaltern wird dieses Phänomen möglich. Da die Schaltung mit Wechselstrom betrieben wird, kehrt sich die Stromrichtung nach jeder Halbperiode um. Die Orientierung der Dioden ist so gewählt, dass der Strom nur durch eine bestimmte Lampe und einen bestimmten Schalter fließen kann. Dadurch leuchtet bei geschlossenen Schaltern je nach Halbperiode entweder die rote oder die grüne Lampe. Die Orientierung der Dioden sind maßgeblich für dieses Phänomen. Ein zusätzlicher, sehr kleiner Widerstand wird in Reihe zu den Dioden geschaltet. Dieser hat zwar für unser Phänomen prinzipiell keine Bedeutung, beim Experimentieren wird man aber verschiedene Reihenfolgen und Orientierungen der Schalter und Lampen ausprobieren. Dabei gibt es Orientierungen bei de-

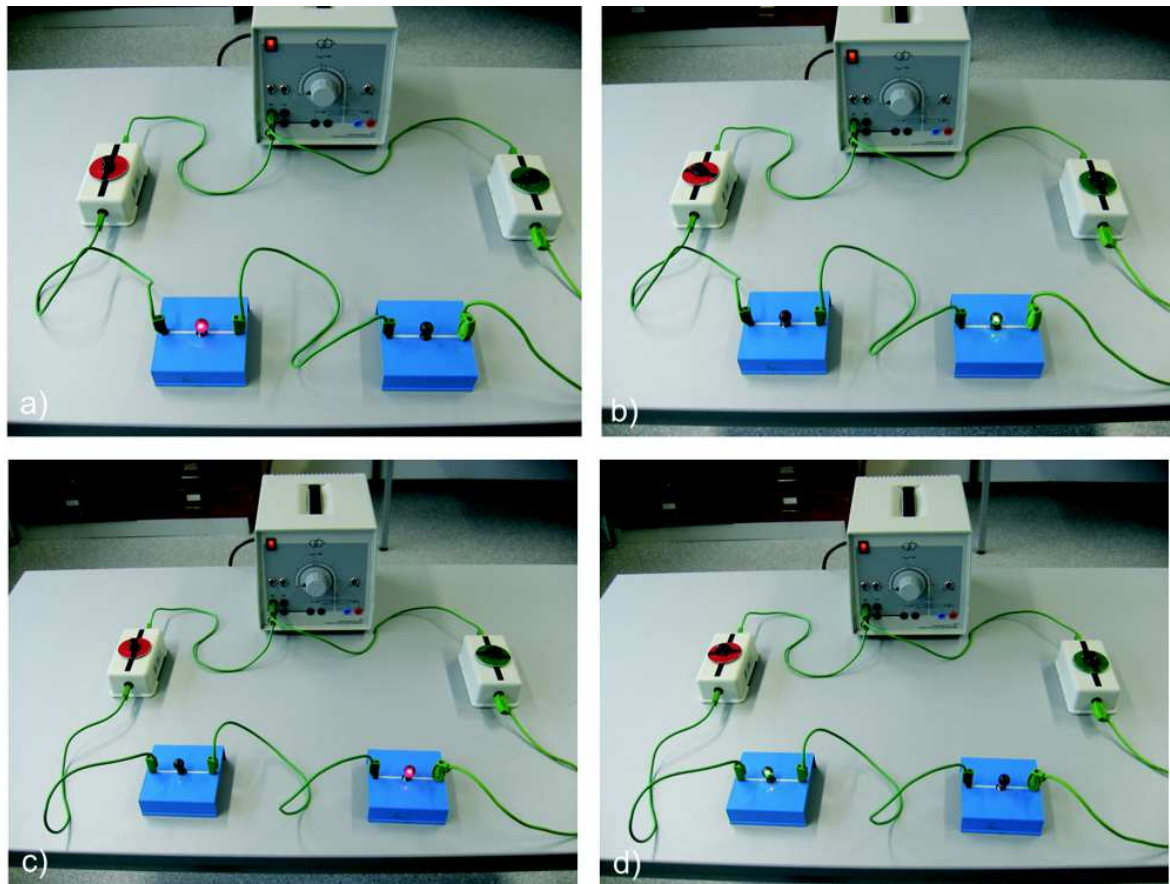


Abbildung 3.1.: In dieser „seltsamen Reihenschaltung“ lassen sich die rote und die grüne Lampe mit den entsprechenden Schaltern unabhängig voneinander schalten.

a) Der rote Schalter schaltet die rote Lampe.

b) Der grüne Schalter schaltet die grüne Lampe.

c) und d) Dies gilt auch dann, wenn man die beiden Lampenfassungen untereinander vertauscht (Dabei darf sich die Orientierung der Lampenfassung relativ zur Stromrichtung nicht ändern).

nen eine Halbwelle kurzgeschlossen ist. In diesem Fall fließt der Strom durch keine der beiden Lampen¹. Um eine Zerstörung der Bauelemente zu vermeiden, werden zusätzliche Schutzwiderstände in Reihe zu den Dioden geschaltet (Abb. 3.2 unten rechts). Diese befinden sich unter den Lampenfassungen und sind daher für den Experimentator nicht auf den ersten Blick erkennbar. Damit bei genauerer Untersuchung der Lampenfassungen und der Schalter das Prinzip des Phänomens nicht sofort offensichtlich wird, wurden die elektrischen Bauelemente mit schwarzer Farbe unkenntlich gemacht. Dadurch wird zwar deutlich, dass es sich hierbei um eine „modifizierte“ Reihenschaltung handelt, was jedoch hier genau verändert wurde bzw. um welche Bauteile es sich hier im Einzelnen handelt, soll zunächst verborgen bleiben.

¹Wir betrachten bei dieser Argumentation die Dioden in Durchlassrichtung als widerstandslos und in Sperrrichtung als Isolator.

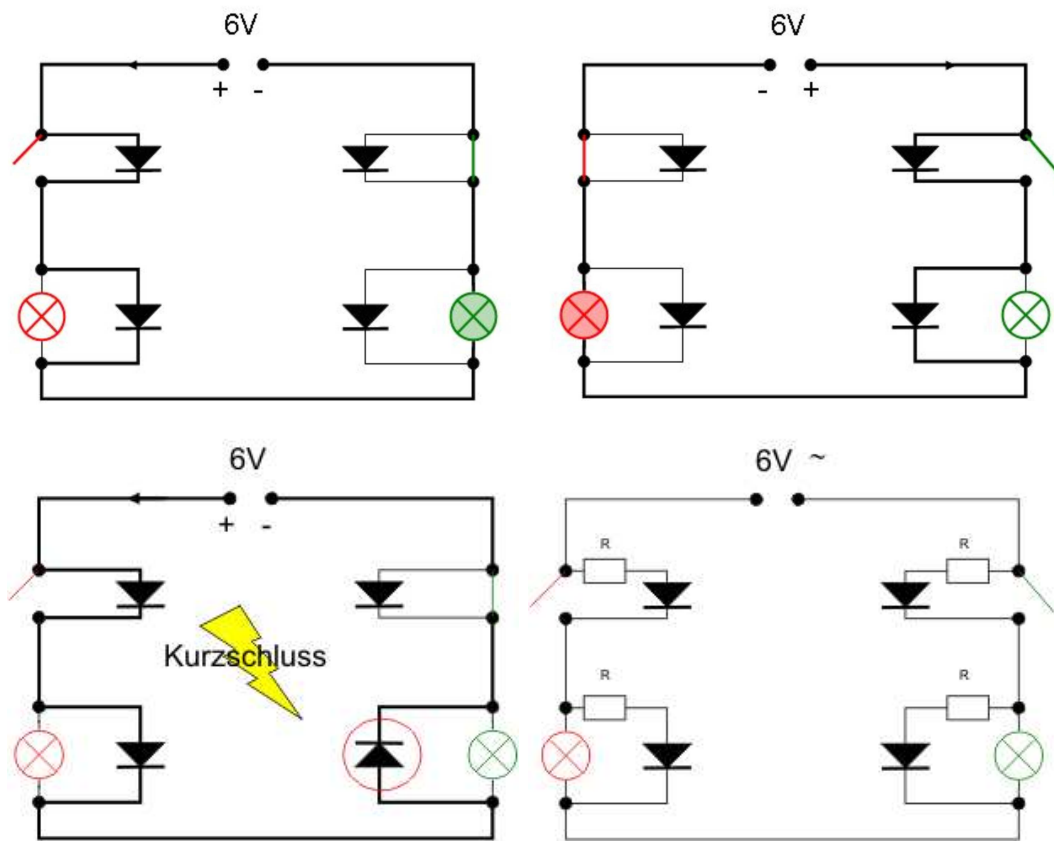


Abbildung 3.2.: **Die oberen Bilder:** Je nach Stromrichtung leuchtet bei einem geschlossenen Schalter immer die entsprechende Lampe. Im linken Bild leuchtet die grüne Lampe und im rechten Bild die rote. Die Ladung fließt entlang der fettgedruckten Leitungen. Die Dioden werden in Durchlassrichtung als widerstandslos betrachtet.

Die unteren Bilder: Je nach Orientierung der Dioden kann es in der Schaltung zu einem Kurzschluss kommen und die Dioden können zerstört werden (unten links). Deshalb werden zusätzlich Schutzwiderstände $R = 0,5\Omega$ in Reihe zu jeder Diode geschaltet (unten rechts).

3.1.1. Erfahrungen im Seminar

3.1.1.1. Vorführung des Phänomens

Ich stellte den Teilnehmern die Schaltung bereits vollständig aufgebaut vor, wie es in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Zunächst betätigte ich nacheinander den roten und den grünen Schalter. Es leuchtet dann jeweils die entsprechende Lampe. Die Tatsache, dass sich beide Lampen praktisch unabhängig voneinander schalten lassen, sorgt in der Regel bei den Teilnehmern bereits für Verblüffung. Diese wird noch größer, wenn ich die beiden Lampen vertausche², und sich die beiden Lampen noch immer unabhängig voneinander schalten lassen.

²Bei der Vertauschung der Lampen muss darauf geachtet werden, dass dabei ihre Orientierung bzw. die Orientierung der zu ihr parallelgeschalteten Diode nicht geändert wird.

3.1.1.2. Fragestellungen

Spätestens nachdem die Seminarteilnehmer die Schalter und die Lampen einmal selbst in die Hand genommen haben, bemerken sie die „seltsamen Bauelemente“. Von diesem Moment an laufen alle daraus folgenden Untersuchungen darauf hinaus, diese Bauelemente zu identifizieren und zu verstehen. Dadurch liegt im gewissen Sinne eine „Einschränkung der Offenheit bzw. des Untersuchungsfeldes“ vor. Diese ist jedoch aus meiner Sicht an dieser Stelle nicht von Nachteil, da die Untersuchungsmethoden und auch die Materialien, mit denen die Teilnehmer versuchen, die unbekannten Bauteile zu identifizieren und deren Rolle in der Schaltung zu verstehen, nicht vorgegeben werden.

Im Gegenteil: Diese Einschränkung des Untersuchungsfeldes versuche ich als Vorteil zu nutzen, indem ich dieses Phänomen insbesondere zu Beginn des Seminars einsetze. Da ich davon ausgehe, dass die Teilnehmer zu Beginn des Seminars praktisch keine Erfahrungen bezüglich offener Experimentierweisen haben, können sie an einem solchen Phänomen erste Erfahrungen sammeln. Je komplexer das Phänomen ist, desto schwieriger fällt es den Teilnehmern konkrete eigene Fragestellungen zu formulieren. Bei diesem Phänomen kristallisieren sich bei den Teilnehmern in der Regel Fragestellungen folgender Art heraus:

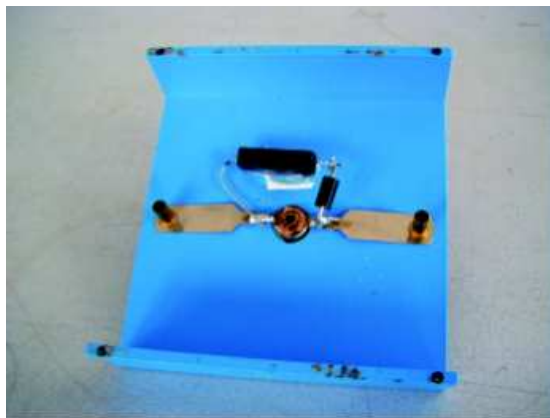


Abbildung 3.3.: Bei einem Blick unter die Lampenfassungen offenbaren sich zwei (noch) unbekannte, elektrische Bauelemente.

1. Welche elektronischen Bauelemente befinden sich unter den Schaltern und den Lampen? Sind diese Bauelemente bei allen Schaltern und Lampen identisch?
2. Was passiert, wenn man nach und nach alle Bauteile „umdreht“?
3. Was bewirkt ein Vertauschen der Bauelemente untereinander?

und die wahrscheinlich wichtigste Frage:

4. Wie kann man (experimentell) bestimmen, um welche Bauteile es sich handelt?

3.1.1.3. Experimentelle Vorgehensweisen der Teilnehmer

Bei ersten eigenen Experimenten mit der Schaltung, wird den Teilnehmern sehr schnell eine Positions- und Richtungsabhängigkeit der Schalter und der Lampen bewusst. Dreht man beispielsweise einen der beiden Schalter innerhalb der Schaltung um, so verändert sich ihr gesamtes Verhalten.

In der Regel bestehen deshalb die ersten Tätigkeiten darin, möglichst viele Variationen der Positionierung und Orientierung der Schalter und Lampen auszuprobieren und das Verhalten der Schaltung zu protokollieren. Das sah beispielsweise folgendermaßen aus:

Studierende:

Aktion: Der rote Schalter wird um 180° gedreht angeschlossen.

Beobachtung: Die rote Lampe leuchtet auch dann leicht, wenn beide Schalter ausgeschaltet sind.

Schlussfolgerung: Auch bei ausgeschalteten Schaltern kann in diesem Fall in der Schaltung Strom fließen.

Aktion: Die rote Lampe wird um 180° gedreht angeschlossen.

Beobachtung: Grüner Schalter ein: Beide Lampen leuchten.
Roter Schalter ein: Beide Lampen leuchten, aber schwächer.
Beide Schalter ein: Beide Lampen leuchten hell.

Aktion: Die rote Lampe und der rote Schalter werden um 180° gedreht angeschlossen.

Beobachtung: Beide Schalter ausgeschaltet: Beide Lampen leuchten sehr schwach.
Nur roter Schalter ein: Beide Lampen leuchten etwas heller.
Nur grüner Schalter ein: Beide Lampen leuchten etwa gleich hell.
Beide Schalter ein: Beide Lampen leuchten besonders hell.

Schlussfolgerung: Trotz ausgeschalteten Schaltern fließt Strom, wenn auch nur ein geringer.
Die Schalter und die Lampen scheinen daher eine Art Brückenfunktion zu haben.

Diesen Schritten folgten noch viele weitere. Am Ende waren die Teilnehmer in der Lage, aus den Beobachtungen Hypothesen zu bilden.

Studierende:

Aus den Versuchen kann geschlossen werden, dass die einzelnen Bauteile des Stromkreises verändert wurden. Es wird vermutlich neben der offensichtlichen Reihenschaltung eine Parallelschaltung verwendet, die unter bestimmten Bedingungen einen Stromfluss ermöglicht.

Wir nehmen daher an, dass die Schalter und die Lampen mit parallel geschalteten Dioden bestückt sind, denn Dioden lassen den Strom nur in einer Richtung durch.

Den Seminarteilnehmern waren nach eigenen Angaben die wesentlichen Eigenschaften einer Diode (Eine Diode lässt den Strom nur in einer Richtung passieren) bekannt. Dies habe ich später von allen Teilnehmern vorausgesetzt. Ich halte dies für legitim, da das Seminar im Hauptstudium angesetzt war. Bei den Studierenden der Primarstufe wird die Diode zwar in den entsprechenden Fachvorlesungen der Physik nicht explizit behandelt, ihr Funktionsprinzip wird jedoch in der Grundlagenvorlesung der Technik ausführlich diskutiert.

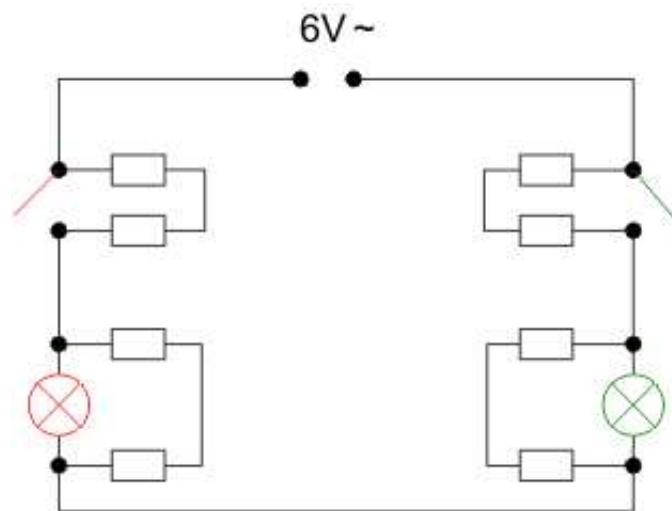


Abbildung 3.4.: Ein Ersatzschaltbild, in dem davon ausgegangen wird, dass es sich bei den unbekannten Bauelementen um Widerstände handelt.

3.1.1.4. Identifizierung der Bauelemente

Nun sollen einige Untersuchungen der Seminarteilnehmer genauer betrachtet werden. Beispielsweise identifizierte eine der Gruppen, nachdem sie die Lampenfassungen von unten betrachtet und verschiedene Orientierungen im Stromkreis ausprobierten, beide unbekannten Bauelemente als Widerstände³. Daraufhin zeichneten Sie ein entsprechendes Ersatzschaltbild.

Im nächsten Schritt sollten die Schalter genauer untersucht werden. Dazu wurde einer der beiden Schalter mit einer Original-Lampenfassung in Reihe geschaltet.

Die Studierenden machten dabei folgende Beobachtungen und Schlussfolgerungen:

Studierende:

Beobachtung:

Sowohl bei eingeschaltetem, als auch bei ausgeschaltetem Schalter leuchtet das Lämpchen. Bei eingeschaltetem Schalter leuchtet es viel heller, als wenn der Schalter aus ist.

Erklärung:

Bei eingeschaltetem Schalter fließt der gesamte Strom auf dem Weg des kleinsten Widerstandes (durch den Schalter). Bei ausgeschaltetem Schalter fließt der Strom durch die beiden Widerstände. Dadurch wird das Lämpchen dunkler.

Dadurch wird die Theorie aus der Sicht der Teilnehmer bestätigt. Es ist jedoch reiner Zufall, dass sie im Experiment sozusagen die „richtige“ Orientierung des Schalters wählten (Durchlassrichtung). Hätten sie zufällig den Schalter in der entgegengesetzten Orientierung eingesetzt oder die Orientierung bewusst geändert, gäbe es keinen Stromfluss im ausgeschalteten Zustand und die Theorie wäre nicht haltbar gewesen. Nachdem ich sie später am Ende des Seminars fragte, warum sie den Schalter nicht einfach umgedreht haben, antworteten sie: „Bei einem Widerstand ist es egal, wie rum man ihn in eine Schaltung einbaut.“ Sie waren demnach so

³Diese Vorstellung kann auch daher kommen, dass je nach Orientierung der Bauteile im Stromkreis die Lampen heller, dunkler oder überhaupt nicht leuchten.

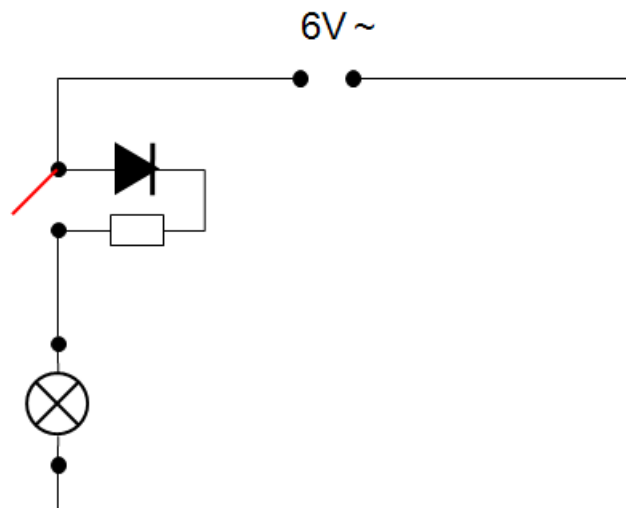


Abbildung 3.5.: Ein Schalter wurde mit einer nicht manipulierten Lampenfassung in Reihe geschaltet.

fest von ihrer eigenen Theorie (es handelt sich um Widerstände) überzeugt, dass sie eine solche Überprüfung nicht für notwendig hielten.

Dieser Fall trat jedoch im nächsten Schritt ein, der darin bestand, die Werte der Widerstände zu messen:

Studierende:	
Experiment:	Eine Glühlampenfassung ohne Lämpchen wird mit einem Ampèremeter in Reihe geschaltet. Wir messen den Strom bei $U=1V$.
Ergebnis:	Der gemessene Strom beträgt immer Null Ampère. Das widerspricht unseren Erwartungen. Nachdem wir die Fassung umgedreht haben, messen wir $U=1V$ und $I=7,4A$.
Schlussfolgerung:	Wenn der Strom zuerst durch das kleine Bauteil und dann durch das große Bauteil fließt, kann man die Stromstärke messen. Im umgekehrten Fall funktioniert dies nicht.
Vermutung:	Bei einem der beiden Bauteile handelt es sich um eine Diode, die abhängig von der Stromrichtung den Strom durchlässt oder nicht.

Von diesem Moment an gingen die Studierenden davon aus, dass es sich bei einem der beiden Bauteile um eine Diode handelt. Sie bestimmten die Durchlassrichtung der Diode in den Schaltern mit Hilfe der Schaltung in Abbildung 3.5. Die Orientierung der Dioden in den Lampenfassungen wurden mit Hilfe der Schaltung in Abbildung 3.6 bestimmt. Dabei wird eine manipulierte und eine sich im Originalzustand befindliche Lampenfassung in Reihe geschaltet, sowie die Lampe aus der manipulierten Fassung entfernt. Leuchtet die Glühbirne nun, so ist dies ein Zeichen dafür, dass die Dioden in Durchlassrichtung geschaltet sind.

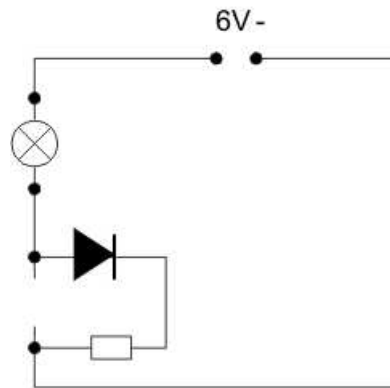


Abbildung 3.6.: Bestimmung der Durchlassrichtung der Diode in einer Lampenfassung. Eine manipulierte Fassung und eine Lampenfassung im Originalzustand wurden in Reihe geschaltet. Die Lampe wurde aus der manipulierten Fassung entfernt.

3.1.1.5. Messtechnische Probleme

Nachdem klar geworden war, dass es sich bei den Bauteilen teilweise um Dioden handelt, kam es oft vor, dass die Studierenden dies messtechnisch überprüfen wollten. Dazu wurde in vielen Fällen eine Widerstandsmessung verwendet. Die Idee bestand darin, den Widerstand der Diode sowohl in Durchlass- als auch in Sperrrichtung zu messen. Im Allgemeinen wird dabei erwartet, dass der Widerstand der Diode in Durchlassrichtung praktisch Null, und in Sperrichtung unendlich groß ist.

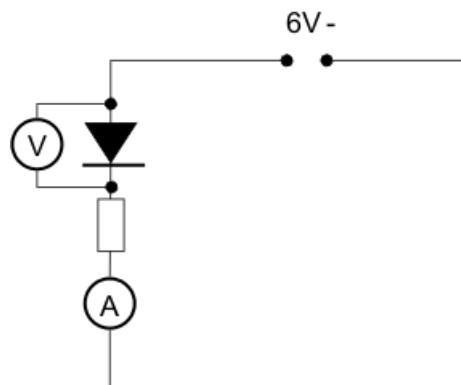


Abbildung 3.7.: Durch Strom- und Spannungsmessung wird versucht, den „Widerstand“ einer Diode zu bestimmen.

In Abbildung 3.7 wird die bei den Messungen verwendete Schaltung dargestellt. Es zeigte sich jedoch, dass die erzielten Messergebnisse nicht mit den Erwartungen der Teilnehmer übereinstimmten. Statt eines unendlich großen Widerstandswertes, ergaben sich in Sperrichtung für die Diode Widerstandswerte im Kilo-Ohm-Bereich. Dieser Umstand war für die meisten Seminararteilnehmer eine große Schwierigkeit, die sie sich nicht erklären konnten. Liegt hier ein messtechnisches Problem vor oder handelt es sich bei dem Bauteil eventuell doch nicht um eine Diode?

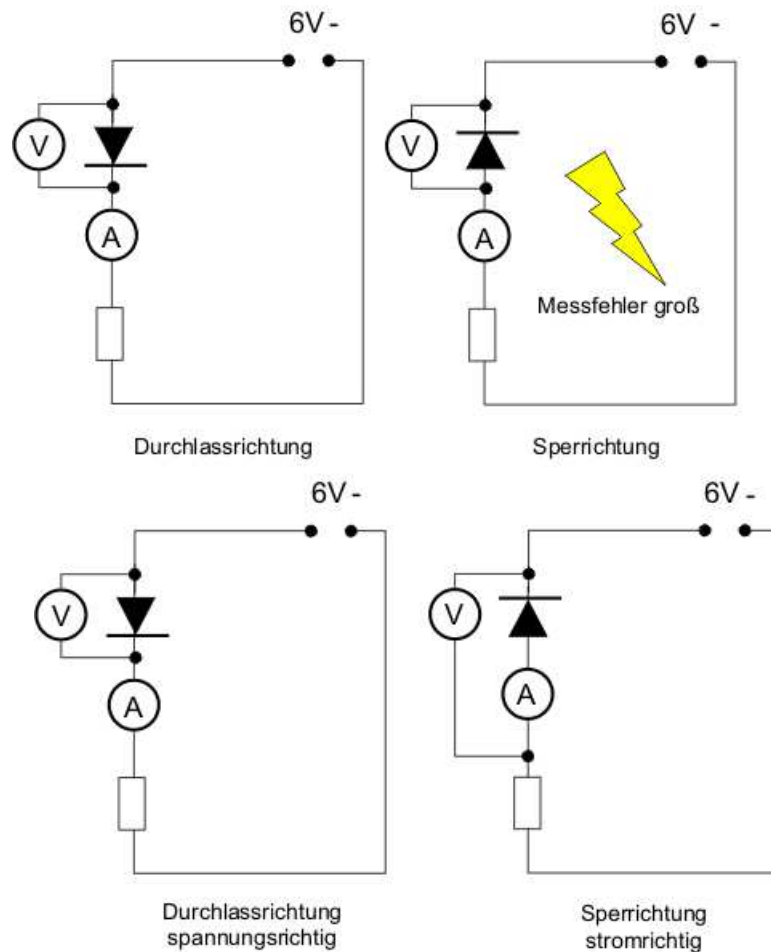


Abbildung 3.8.: **Die oberen Bilder:** Eine spannungsrichtige Messung des Widerstandes der Diode in Sperrichtung führt zu großen Messfehlern. Die spannungsrichtige Messung ist nur für den Durchlassbereich günstig.

Die unteren Bilder: Bei diesen Anordnungen sind die Messfehler besonders klein. Die Durchlassrichtung der Diode wird spannungsrichtig und die Sperrichtung der Diode stromrichtig vermessen.

Soll ein Widerstand durch Strom- und Spannungsmessung gemessen werden, so kann dies zu Problemen führen, wenn der zu messende Widerstandswert entweder sehr klein oder sehr groß ist. In vorliegenden Fall ist zu erwarten, dass der Widerstandswert der Diode in Sperrichtung sehr groß ist. Benutzt man zu dessen Messung die Schaltung in Abbildung 3.7 so führt dies zu großen Messfehlern, da der Innenwiderstand des Voltmeters in der gleichen Größenordnung liegt wie der Widerstand der Diode.

Der Strom, der durch das Voltmeter fließt, kann deshalb in diesem Fall nicht mehr vernachlässigt werden. Diese so genannte „spannungsrichtige“ Messung eignet sich nicht für große Messwiderstände. Stattdessen müsste eine so genannte „stromrichtige“ Messung verwendet werden. Bei einer stromrichtigen Messung (Abb. 3.8 unten, rechtes Bild) kann der (sehr kleine) Innenwiderstand des Ampèremeters gegenüber dem großen Widerstand der Diode in Sperrichtung vernachlässigt werden. Der Messfehler wird in diesem Fall kleiner sein. Bei Messungen dieser Art muss also unbedingt darauf geachtet werden, dass die Durchlassrichtung der Diode

stromrichtig- und die Sperrrichtung spannungsrichtig gemessen wird.

Nach meiner Erfahrung kommen die Studierenden nicht selbstständig auf diese messtechnische Feinheit, obwohl alle das Anfängerpraktikum bereits durchlaufen mussten und sie dort einen entsprechenden Versuch zum strom- und spannungsrichtigen Messen durchgeführt haben. Hier werden sie aber innerhalb eines komplexen Zusammenhangs mit dieser Thematik konfrontiert.

3.1.1.6. Ein besonderes Experiment

Es gab eine Gruppe, die zur Prüfung ihrer Hypothesen ein bemerkenswertes Experiment durchführte. Aufgrund ihrer vorangegangenen Untersuchungen waren sie davon überzeugt, dass es sich bei den Bauteilen um Widerstände und Dioden handeln müsse. Sie konnten auch einen Schaltplan mit richtig verschalteten Dioden zeichnen. Es galt nun experimentell zu beweisen, dass dieser Schaltplan richtig ist.

Es war klar, dass die Schaltung nur mit Wechselstrom funktionieren kann. Dieser hat bei einem herkömmlichen Netzgerät eine Frequenz von 50 Hz. Das bedeutet, dass in der Schaltung die Lampen nicht kontinuierlich brennen, sondern mit einer Frequenz von 50 Hz abwechselnd aufblinken. Da das menschliche Auge diese hohe Frequenz nicht mehr auflösen kann, hat man den Eindruck, die Lampen brennen ständig. Wenn man jedoch die Frequenz des Wechselstroms deutlich verkleinert, so müsste das abwechselnde Auf- und Abblinken der Lampen erkennbar werden. Dieses Experiment führte die Gruppe durch, indem sie das Netzgerät durch einen Frequenzgenerator ersetzte. Bei festgehaltener Amplitude wurde die Frequenz von 50 Hz langsam bis auf 1 Hz abgesenkt. Die Beobachtungen sind beeindruckend, denn man erkennt deutlich, wie die Lampen zunächst kontinuierlich leuchten und dann plötzlich bei entsprechend kleiner Frequenz immer deutlicher abwechselnd zu blinken beginnen.

3.1.1.7. Zusammenstellung der von mir bereitgehaltenen Materialien

Folgende Materialien wurden von mir im Rahmen des Seminars bereitgehalten.

1. Gleich- und Wechselspannungsnetzgeräte der Firma LEYBOLD 12V/6A,
2. ein Steckbrett zum Herstellen elektrischer Schaltungen,
3. verschiedene Widerstände $R = 100\Omega, 150\Omega, 420\Omega, 680\Omega, 1k\Omega, 10k\Omega, 100K\Omega, 470K\Omega$ und $1M\Omega$, sowie Dioden (CONRAD P600J) für dieses Steckbrett,
4. Widerstände und Dioden (siehe oben), die selbst verlötet werden können,
5. zwei Digitalmultimeter und analoge Volt- und Ampèremeter,
6. zwei bestückte Lampenfassungen im Originalzustand,
7. einen Frequenzgenerator und ein Oszilloskop.

3.1.2. Übersicht über die Aspekte des Phänomens

An dieser Stelle sind noch einmal alle Aspekte zusammengefasst, die das Phänomen „seltsamer Stromkreis“ bietet und welche davon von den Studierenden bearbeitet wurden. Die Aussage „ja“ bedeutet, dass die Mehrzahl aller Gruppen diesen Aspekt untersuchten. Bei „nein“ hat

keine der Gruppen den Aspekt untersucht. Kommt es in wenigen Fällen (Ausnahmen) zu einer Beobachtung eines bestimmten Aspektes, so kommt dies durch das Feld „teilweise“ zum Ausdruck.

Aspekt des Phänomens	wurde näher untersucht
Lampen untereinander austauschen	ja
Schalter untereinander austauschen	ja
Lampen 180° drehen	ja
Schalter 180° drehen	ja
Bauelemente identifizieren	ja
„Wechselblinken“ der Lampen	einmal
„normale“ Lampen einsetzen	teilweise
„normale“ Schalter einsetzen	teilweise
Widerstandsmessungen (Strom/Spannung)	ja
Durchgangsprüfung	teilweise

Tabelle 3.1.: Zusammenstellung aller Aspekte des Phänomens „seltsamer Stromkreis“, die von den Seminarteilnehmern beobachtet und untersucht wurden.

3.1.3. Fazit

Das Phänomen „seltsamer Stromkreis“ eignet sich aus meiner Sicht gut für einen ersten Kontakt mit einer offenen naturwissenschaftlichen Experimentierweise. Die theoretischen Voraussetzungen (Stromkreisgesetze, Diode) sind überschaubar und können bei allen Seminarteilnehmern (Grundschule, Realschule und Gymnasium) im Hauptstudium in der Regel als bekannt vorausgesetzt werden. Auch die messtechnischen Anforderungen (Widerstandsmessungen) können als eher gering betrachtet werden. Allerdings zeigt sich hier, dass schnell Schwierigkeiten auftreten können (strom- und spannungsrichtiges Messen), wenn aufgrund von falschen Herangehensweisen beim Messen die Resultate nicht den Erwartungen entsprechen. In vielen Fällen musste ich gerade bei diesem Punkt Hilfestellungen geben. Im Falle von Sek. I oder Sek. II Studierenden teilte ich ihnen mit, dass der elektrische Widerstand einer Diode entweder sehr klein oder sehr groß ist, und forderte sie auf, sich über die daraus folgenden messtechnischen Konsequenzen zu informieren. Im Falle von Studierenden der Primarstufen teilte ich ihnen im Rahmen einer kurzen Diskussion mit, dass man mit Hilfe einer Durchgangsprüfung⁴ feststellen kann, in welcher Richtung ein Stromfluss möglich ist. Dies war in der Regel völlig ausreichend, da sie die „Funktionsweise“⁵ von Dioden bereits aus ihren Vorlesungen kannten.

3.2. Die Rollbahn

Das zweite Erprobungs-Phänomen kommt aus dem Bereich der Mechanik, und wird in einigen Science-Centern ausgestellt oder in Physikvorlesungen- oder büchern (z.B. [53]) diskutiert. Es

⁴Bei einer Durchgangsprüfung wird vom Messgerät ein akustisches oder optisches Signal ausgegeben, wenn im Kreis der Anschlusskabel des Messgerätes und dem dazwischen liegendem Bauelement Strom fließt.

⁵Das bedeutet: Eine Diode lässt den Strom nur in einer Richtung passieren.

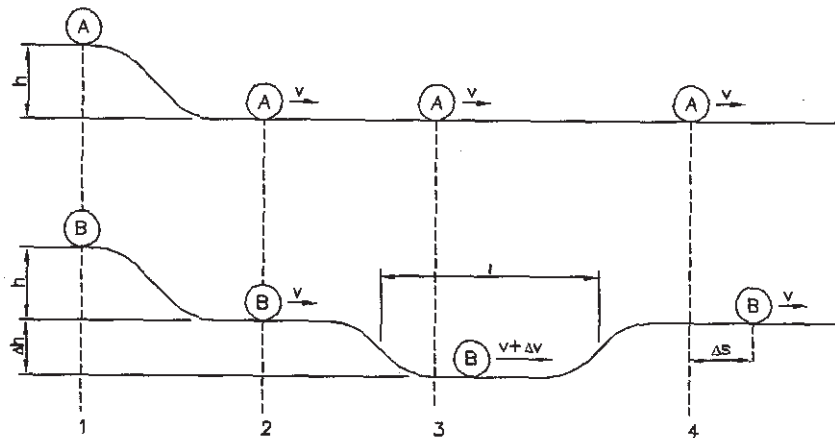
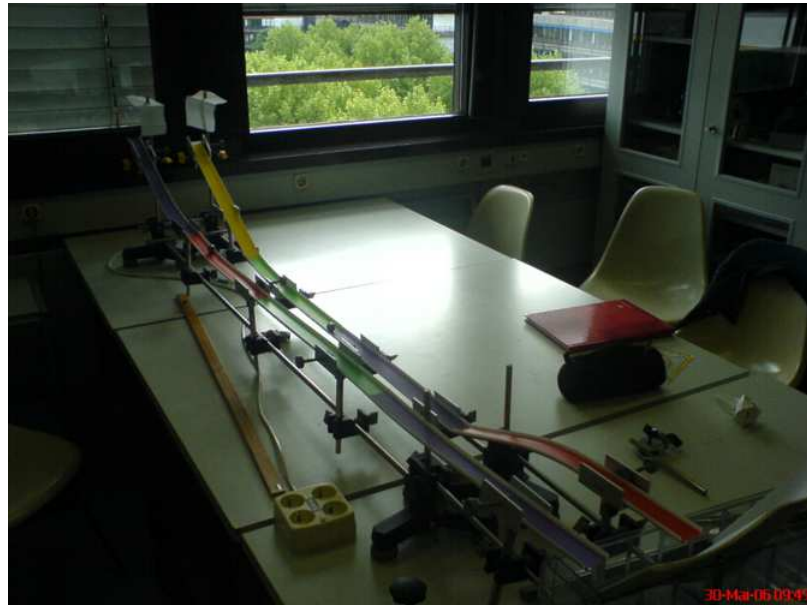


Abbildung 3.9.: Aufbau der beiden Rollbahnen. Beide Kugeln starten von derselben Höhe. Die Kugel B durchläuft zusätzlich eine Senke der Tiefe Δh und hat dennoch am Ziel einen Vorsprung Δs gegenüber der Kugel A . Die Skizze wurde entnommen aus [53].

besteht aus zwei Bahnen, in denen zwei gleiche Kugeln von einem Startpunkt der Höhe $h + \Delta h$ aus herunterrollen. Die Enden beider Bahnen befinden sich auf gleicher Höhe Δh . Die Kugel auf der ersten Bahn A durchläuft die Höhe h und danach eine horizontale Strecke s . Die Kugel auf der zweiten Bahn B durchläuft ebenfalls die Höhe h , jedoch zusätzlich auf dem waagerechten Stück eine Senke der Tiefe Δh und der Länge l (Abb. 3.9). Lässt man beide Kugeln gleichzeitig beide Bahnen herunterrollen, so zeigt sich, dass die Kugel auf der Bahn B das Ziel früher erreicht als die Kugel auf Bahn A . Dies mag zunächst verwunderlich erscheinen, da Kugel B zusätzlich die Senke durchlaufen und einen größeren Weg zurücklegen muss als Kugel A . Darüber hinaus würde eine größere Geschwindigkeit von Kugel B im Ziel nach Durchlaufen der Bahn dem Energiesatz widersprechen. Wie kann sie also schneller am Ziel sein?

Zunächst lässt sich qualitativ sehr einfach feststellen, dass die Geschwindigkeit beider Kugeln am Ende der Bahnen identisch ist. Verlängert man die Bahnen in der Waagerechten und lässt die Kugeln weiter rollen, so verändert sich der Vorsprung Δs der Kugel B gegenüber Kugel A

nicht. Die Geschwindigkeit beider Kugeln muss deshalb gleich groß sein. Somit ist der Energiesatz keineswegs verletzt, es muss bei diesem Phänomen jedoch strikt zwischen den Begriffen „schneller“ und „früher“ unterschieden werden. Kugel B ist offensichtlich (am Ende der Bahn) nicht *schneller* als Kugel A , sie erreicht das Ende der Bahn *früher* als Kugel A . Im Gegensatz zu Kugel A durchläuft Kugel B eine Senke, in der ihre Geschwindigkeit größer ist als die der anderen Kugel. Deshalb legt Kugel B die untere Strecke l in einer kürzeren Zeit zurück als Kugel A auf ihrer Bahn die entsprechende Strecke. Auf diese Weise kommt ein „Vorsprung“ der Kugel B gegenüber der Kugel A zu Stande, sie ist in gewisser Weise früher am Ziel. Die Momentangeschwindigkeit beider Kugeln gewinnt man leicht aus der Umwandlung von potentieller in kinetische Energie⁶. In den Punkten 2 und 4 in Abb. 3.9 haben beide Kugeln die gleiche Geschwindigkeit. Nur im Punkt 3 sind sie voneinander verschieden, da es eine zusätzliche Höhendifferenz gibt. Die Geschwindigkeit beider Kugeln in Punkt 3 ist gegeben durch:

$$\begin{aligned} v_A &= \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \\ v_B &= \sqrt{2 \cdot g \cdot (h + \Delta h)} \end{aligned}$$

Dabei setzen wir voraus, dass die Kugel die Höhendifferenzen beliebig schnell überwinden kann, sie braucht also keine Zeit um in die Senke hinein und wieder heraus zu rollen. Der Vorsprung Δs kommt dadurch zu Stande, dass die Kugeln das Teilstück l mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchlaufen. Somit gilt:

$$\Delta s = (v_B - v_A) \cdot t \quad (3.1)$$

Dabei ist t die Zeit, in der die Kugel B die Strecke l durchläuft.

$$\Delta s = l \left(1 - \frac{v_A}{v_B} \right) \quad (3.2)$$

Durch Einsetzen der oberen Beziehungen für die Geschwindigkeiten erhalten wir:

$$\Delta s = l \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\Delta h}{h}}} \right) \quad (3.3)$$

Man erkennt, dass der Vorsprung der Kugel B proportional zur Länge l der Senke ist. Die Abhängigkeit von der Tiefe der Senke ist nicht so leicht zu sehen. Sie wird in Abbildung 3.10 dargestellt. Wir können daher festhalten:

Der Vorsprung Δs ist im Experiment proportional zur Länge l der Vertiefung. Er hängt auch deutlich von der Tiefe Δh der Senke ab. Der Vorsprung ist also umso größer, je größer l ist und je größer Δh wird.

⁶Wir vernachlässigen die Rotationsbewegung der Kugeln und somit den Beitrag der Rotationsenergie.

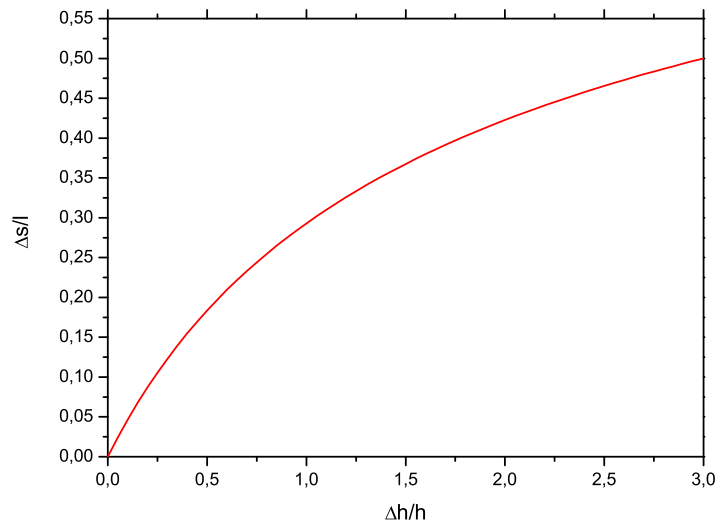


Abbildung 3.10.: Darstellung des relativen Vorsprungs der Kugel B als Funktion der relativen Tiefe der Senke.

3.2.1. Erfahrungen im Seminar

3.2.1.1. Vorführung des Phänomens

Ich benutzte den Aufbau aus Abbildung 3.9 (oben), der aus Schienen einer DARDA-Bahn⁷ zusammengesetzt wurde. Die Bahnen befinden sich auf einem Gestell, welches aus Stativmaterial (PHYWE) besteht. Die Halterungen der Bahnen sind höhenverstellbar, so dass sich z.B. die Starthöhe oder die Tiefe und Länge der Senke verstellen lassen. Ich ließ zwei identische Kugeln aus gleicher Höhe hinunterrollen.

3.2.1.2. Fragestellungen

Das von mir beabsichtigte Phänomen wird von den Teilnehmern schnell erkannt. Die Tatsache, dass eine der beiden Kugeln das Ziel früher erreicht, wird sehr deutlich. Daher kristallisierte sich bei den Teilnehmern die folgende Leitfrage heraus:

Studierende:

Warum ist die eine der beiden Kugeln schneller am Ziel, obwohl sie einen längeren Weg zurücklegen muss und die Bahnen die gleiche Start- und Zielhöhe haben?

Eine Gruppe wiederholte das Experiment zunächst mit verschiedenen großen Kugeln. Dies führte aber schnell zu Schwierigkeiten, da eine große Kugel nach ihren Angaben „in unregelmäßigen Abständen an den Rändern aneckt“ und dadurch ihre Geschwindigkeit gebremst und somit verfälscht wird.

⁷Eine DARDA Bahn ist eine Spielzeugbahn für Fahrzeuge mit Rückziehmotor. Weitere Informationen z.B. unter: www.dardamania.de (Stand: 08/2008)



Abbildung 3.11.: Vorlesungsversuch mit unterschiedlichen Rollbahnen

3.2.1.3. Untersuchungen der Studierenden

Im Rahmen der physikalischen Grundlagenvorlesung wird zum Thema Kinematik ein Versuch durchgeführt, der mit dem Phänomen sehr eng verwandt ist (Abb. 3.11). Zwei Kugeln rollen aus gleicher Starthöhe zwei Bahnen hinunter. Während die eine der beiden Bahnen gerade nach unten verläuft, also eine konstante Steigung besitzt, beschreibt die zweite Bahn einen deutlichen Bogen. Man beobachtet, dass die Kugel, die die gekrümmte Bahn durchläuft (Kugel 2), einen deutlichen (aber konstanten) Vorsprung gegenüber der ersten Kugel (Kugel 1) besitzt. Die Teilnehmer erinnerten sich an diesen Versuch und führten ihn noch einmal durch.

Studierende:

Beobachtung: Nach dem Herunterrollen bewegen sich beide Kugeln mit konstantem Abstand weiter.

Schlussfolgerung: Die Geschwindigkeiten der Kugeln müssen (am Ende) übereinstimmen, und sie hängen nicht von der Krümmung der Bahn ab.

Erklärung: Dies lässt sich mit dem Energierhaltungssatz erklären. Die potentielle und kinetische Energie sind gleich groß. Der Vorsprung von Kugel 2 kommt dadurch zu Stande, dass sie durch die gekrümmte Bahn früher ihre Höchstgeschwindigkeit erreicht.

Der nächste Schritt bestand nun darin, einen Zusammenhang zwischen dem Vorlesungsversuch und dem gezeigten Phänomen herzustellen. Dies geschah auf folgende Weise.

Mit Hilfe weiterer DARDA-Schienen wurden beide Bahnen des „Ausgangsphänomens“ verlängert. Es zeigt sich auch hier, dass beide Kugeln am Ende mit konstantem Abstand, also mit gleicher Geschwindigkeit rollen. Die Gruppe konnte schlussfolgern, dass der Vorsprung dadurch entsteht, dass die eine Kugel früher ihre Höchstgeschwindigkeit erreicht. Die Gruppe hatte demnach aus ihrer Sicht das Phänomen verstanden.

Studierende:

Die Kugeln haben am Ende identische Geschwindigkeiten. Der Vorsprung kommt dadurch zu Stande,

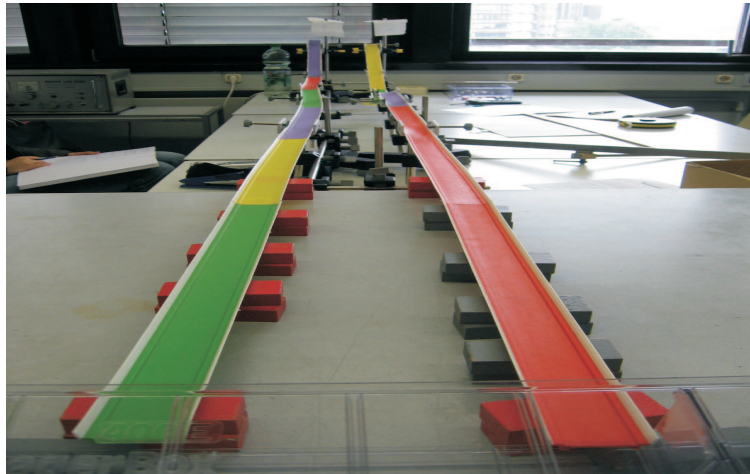


Abbildung 3.12.: Durch Verlängerung der Bahnen kann gezeigt werden, dass die eine Kugel (ebenso wie im Vorlesungsversuch) einen konstanten Vorsprung besitzt.

dass die eine der beiden Kugeln früher ihre Höchstgeschwindigkeit erreicht. Der Energieerhaltungssatz ist deshalb nicht verletzt.

Manche Gruppen versuchten, die kinetischen Energien der rollenden Kugeln auf den Bahnen zu bestimmen. Zu diesem Zweck führten sie Geschwindigkeitsmessungen mit Lichtschranken an den gekennzeichneten Punkten auf den Bahnen durch. Aus der Verdunkelungszeit der Lichtschranken und den Durchmessern der Kugeln, kann auf die Momentangeschwindigkeiten geschlossen werden.

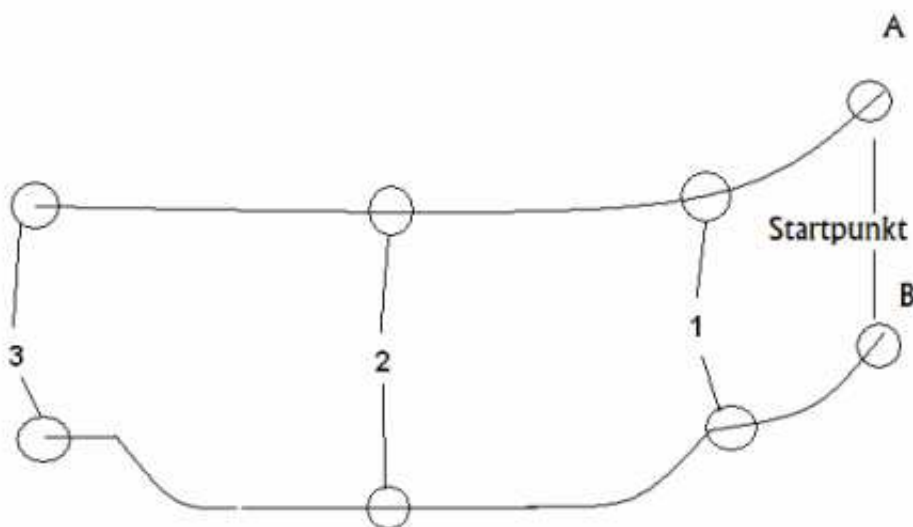


Abbildung 3.13.: Mit Hilfe von Zeitmessungen durch Lichtschranken an verschiedenen Punkten der Bahn wurde versucht, auf die Energien zu schließen.

Die Teilnehmer erwarteten, dass die kinetischen Energien der Kugeln in den Punkten 1 und 3 identisch sind. In Punkt 2 sollte die zweite Kugel aufgrund ihrer Geschwindigkeit, eine höhere kinetische Energie besitzen als die erste Kugel. Dies schien sich auch zunächst zu bestätigen. Aufgrund eines Messfehlers weichen die kinetischen Energien der Kugeln in Punkt 3 deutlich voneinander ab. Der Gruppe war bewusst, dass es sich hier um einen Messfehler handeln muss, im abschließenden Gespräch konnten sie mir jedoch keine genauen Angaben darüber machen. In allen anderen Punkten konnten sie durch Vergleich der Energien mit der potentiellen Energie im Startpunkt zeigen, dass die Energieerhaltung in diesen Punkten gültig ist.

Studierende:

Die Summe aus kinetischer Energie der Kugel und ihrer momentanen potentiellen Energie ist gleich der potentiellen Energie im Startpunkt.

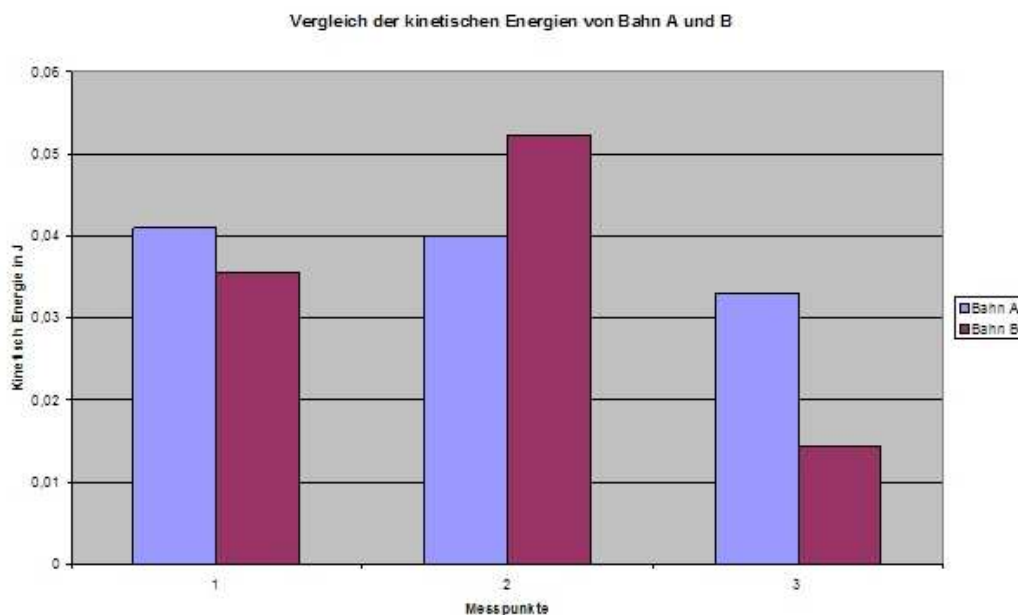


Abbildung 3.14.: Auswertung der Messergebnisse zur Bestimmung der kinetischen Energien an den Punkten 1, 2 und 3 (vgl. Abb. 3.13). Im Punkt 1 stimmen die kinetischen Energien der Kugeln auf beiden Bahnen offenbar im Rahmen der Messungenauigkeiten überein. In Punkt 2 besitzt die Kugel auf Bahn B eine höhere kinetische Energie. Im Punkt 3 stimmen die Energien wahrscheinlich aufgrund einer fehlerhaften Messung nicht überein.

Allerdings muss man sich hier die Frage stellen: „Was nützen mir all diese Messungen in Hinblick auf die Ausgangsfragestellung?“ Genau dies haben manche Gruppen zu wenig getan. Ich führe dies unter Anderem auf folgende Punkte zurück:

1. Ich habe mich insbesondere in dieser Anfangsphase zu stark zurückgehalten. Es wäre wahrscheinlich besser gewesen, an dieser Stelle den Gruppen gezielte Fragen zu stellen wie: „Inwieweit tragen diese Messungen zur Klärung der Ausgangsfragestellung bei?“ Studierende neigen meinen Erfahrungen nach (besonders am Anfang) dazu, Messungen ohne konkreten Grund (Fragestellung) durchzuführen. „Später kann ich die Messergebnisse sicherlich irgendwie noch gebrauchen“. Mittlerweile versuche ich dann, sie darauf

- aufmerksam zu machen und sie dazu zu bewegen, zunächst konkrete Fragestellungen zu formulieren und nicht ins Blaue hinaus zu messen.
2. Die Tatsache, dass die eine Kugel das Ziel früher erreicht, muss auf ihre Geschwindigkeit zurückzuführen sein. Daher erscheint es den Teilnehmern sinnvoll, die Geschwindigkeiten erst einmal zu messen. Dies ist nicht unbedingt nötig, wie die eher qualitativen Untersuchungen der Gruppen in Abschnitt 3.2.1.3 zeigten.
 3. Ich habe mich bemüht, den Aufbau durch geeignetes Stativmaterial so zu gestalten, dass die Form der Bahnen leicht von den Studierenden variiert werden konnte. Leider erwies sich dies in der Praxis als nicht ganz so einfach. Die Tiefe und die Länge der Senke ließen sich nur in einem zu engem Rahmen verändern. Ursache dafür ist die insgesamt begrenzte Länge der Bahnen. Dadurch ließen sich die Abhängigkeiten des Vorsprungs von der Senkenlänge und -Tiefe in Gleichung (3.3) nicht ausreichend genau messtechnisch erfassen.

3.2.2. Ergebnisse

Trotz vieler, meist messtechnischer Probleme, war es den meisten Studierenden möglich, Antworten auf die Ausgangsfragestellung⁸ zu geben. Um diese weitgehend zu beantworten, müssen im wesentlichen die folgenden Punkte verstanden sein:

1. Beide Kugeln haben am Ende der Bahnen die gleichen Geschwindigkeiten.
2. Die Kugel, die als erste das Ziel erreicht, hat einen Teil der Strecke mit einer höheren Geschwindigkeit durchlaufen.
3. Diese Kugel ist deshalb nicht schneller, sondern früher am Ziel.

Die meisten Gruppen waren der Auffassung, dass zur Beantwortung der Ausgangsfragestellung eine Energiebetrachtung nötig sei. Diese Energiebetrachtung setzt jedoch Geschwindigkeitsmessungen voraus, da Informationen über die kinetischen Energien der Kugeln bekannt sein müssen. Dies war der Grund, warum nahezu alle Gruppen (quantitative) Geschwindigkeitsmessungen durchführten. Als Antwort auf die Ausgangsfrage wurde beispielsweise angegeben:

Studierende:

Auf dem Streckenteil zwischen 4 und 5 (nach der Senke) nimmt die Geschwindigkeit von Kugel 2 wieder ab, da die zuvor erfahrene Beschleunigung wieder rückgängig gemacht wird. [...] Da Kugel 2 auf dem Streckenabschnitt zwischen 3 und 4 (in der Senke) mit schnellerer Geschwindigkeit weiter gelaufen ist, hat sie einen Vorsprung gegenüber der ersten Kugel aufgebaut, der auch nach der Bremsung nicht mehr von Kugel 1 aufzuholen ist.

Eine andere, aber sehr ähnliche Argumentation:

Studierende:

Am Ende der Bahn, rollt die Kugel der Bahn 2 wieder auf die Höhe der Bahn 1 und bekommt

⁸ „Warum kommt die eine der beiden Kugeln früher ans Ziel, obwohl sie einen längeren Weg zurücklegen muss und die Bahnen die gleiche Start- und Zielhöhe haben?“

somit wieder die gleiche Geschwindigkeit wie die Kugel der Bahn 1. Da sie aber auf dem unteren Stück einen Vorsprung ausgebaut hat und nun lediglich auf die Geschwindigkeit der anderen Kugel abgebremst wird, bleibt dieser Vorsprung am Ende bestehen, wenn die Kugeln mit gleicher Geschwindigkeit weiter rollen.

Die Gruppen waren in den meisten Fällen in der Lage, die Grundprinzipien, auf denen das Phänomen beruht, in einer verständlichen Weise zu erklären.

3.2.2.1. Zusammenstellung der von mir bereitgehaltenen Materialien

Folgende Materialien wurden von mir (abgesehen von den fertig aufgebauten Bahnen) im Rahmen des Seminars bereitgehalten.

1. Mehrere DARDA-Schienen zum Ausbau der Bahnen,
2. verschieden große Kugeln (paarweise),
3. diverses Stativmaterial,
4. zwei Lichtschranken und Timer zur Zeitmessung,
5. mehrere Messstäbe zur Längenmessung.

3.2.3. Übersicht über die Aspekte des Phänomens

An dieser Stelle sind noch einmal alle Aspekte zusammengefasst, die das Phänomen „Rollbahn“ bietet und welche davon von den Studierenden bearbeitet wurden.

Aspekt des Phänomens	wurde näher untersucht
Warum ist Kugel 1 früher am Ziel?	ja
Geschwindigkeitsmessung mit Lichtschranken	ja
Geschwindigkeitsvergleich durch „Vorsprung“	teilweise
Bestimmung kinetischer Energien	ja
Bestimmung potentieller Energien	ja
Veränderung der Bahnform (Höhe, Tiefe, Senke)	teilweise

Tabelle 3.2.: Zusammenstellung aller Aspekte des Phänomens „Rollbahn“, die von den Seminarteilnehmern beobachtet und untersucht wurden.

3.2.4. Fazit

Das Phänomen macht auf den Unterschied zwischen den Begriffen „schneller“ und „früher“ aufmerksam. Der Vorsprung der einen Kugel war offenbar bei jeder Vorführung groß genug, dass er von den teilnehmenden Gruppen erkannt wurde. Das Phänomen setzt elementare physikalische Kenntnisse in Kinematik voraus, die die Studierenden in ihren Grundvorlesungen behandelt haben. Es zeigte sich aber auch, dass sie teilweise nicht in der Lage waren, einen umfassenden

Zusammenhang zwischen dem Inhalt der Vorlesung und dem hier behandelten Phänomen herzustellen. Dennoch waren die meisten Gruppen am Ende in der Lage, mir die Zusammenhänge zwischen den Begriffen: Geschwindigkeit, Energie und Vorsprung in Bezug auf das vorgeführte Phänomen verständlich zu erklären.

Der Umgang mit den Bahnen erwies sich als deutlich schwieriger, als zunächst von mir angenommen. Eine nahezu beliebige Höhenverstellung der Bahnen ist zwar an vielen Stellen möglich, jedoch sorgen Einflüsse wie z.B. die Reibung durch Stöße der Kugeln mit der Bande für nicht-reproduzierbare Ergebnisse bei Geschwindigkeitsmessungen. Eine Vergrößerung des Vorsprungs durch Verlängerung der Senke ließ sich sowohl mit bloßem Auge, als auch durch quantitative Messungen praktisch nicht beobachten. Aus diesem Grund halte ich dieses Phänomen zumindest in dieser Form nur bedingt für geeignet, zumal sich zeigte, dass sich von der Ausgangsfragestellung abgesehen praktisch keine neuen Untersuchungsziele entwickeln.

3.3. Schwimmende Heftzwecken - Ein Phänomen zur Oberflächenspannung

Dieses Phänomen wurde vor kurzer Zeit von Schlichting [76] behandelt. Es gibt auch eine Publikation von Vella und Mahadevan [92], die sich in einem anderen Zusammenhang mit dem Phänomen beschäftigten.



Abbildung 3.15.: Heftzwecken schwimmen auf der Wasseroberfläche in einem gefüllten Glas.

Legt man eine Heftzwecke mit der flachen Seite nach unten (vorsichtig) auf eine Oberfläche eines mit Wasser gefüllten Glases, so schwimmt diese (Abb. 3.3). Im Allgemeinen besitzen Heftzwecken eine Schutzkappe aus Kunststoff. Diese wird bei einigen Exemplaren entfernt und ebenfalls in das Wasserglas gegeben. Dabei sind verschiedene interessante Variationen möglich.

1. Eine einzelne Heftzwecke wird in das Wasserglas gebracht. Sie wird vom Rand des Glases abgestoßen.
2. Zwei Heftzwecken werden in das Wasserglas gebracht. Sie ziehen sich gegenseitig an.

3. Eine einzelne Schutzkappe wird in das Wasserglas gebracht. Sie wird vom Rand des Glases angezogen.
4. Zwei Schutzkappen werden in das Wasserglas gebracht. Sie stoßen sich gegenseitig ab.
5. Eine Heftzwecke und eine Schutzkappe werden in das Wasserglas gebracht. Sie stoßen sich gegenseitig ab.

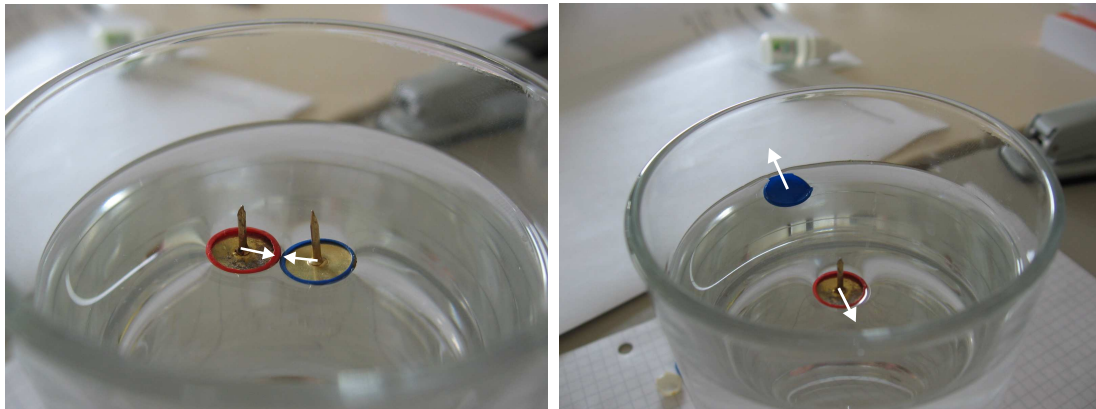


Abbildung 3.16.: **Links:** Anziehende Wirkung zwischen zwei identischen Heftzwecken.

Rechts: Eine Heftzwecke und eine Schutzkappe stoßen sich gegenseitig ab.

Es stellt sich die Frage, wie es zu derartigen Wechselwirkungen kommen kann. Zunächst könnte man vermuten, es handle sich um elektrostatische oder magnetische Wechselwirkungen⁹, es lässt sich jedoch leicht nachweisen, dass sich die Beobachtungen damit nicht begründen lassen. Wenn man bedenkt, dass sowohl die Heftzwecken als auch die Schutzkappen normalerweise nicht auf der Wasseroberfläche schwimmen können, sondern aufgrund der wirkenden Oberflächenspannung an der Oberfläche verweilen¹⁰, kommt man einer „Erklärung“ der Beobachtungen schon etwas näher.

Die Wechselwirkungen zwischen Heftzwecken, dem Glasrand und den Schutzkappen könnte mit der Oberflächenspannung des Wassers zusammenhängen.

3.3.1. Oberflächenspannung

Normalerweise wird die Oberflächenspannung in Lehrbüchern in Zusammenhang mit Kraftwirkungen diskutiert [82, 21]. Schlichting wählt in [76] einen anderen Weg, indem er die Oberflächenspannung mit Hilfe der Energie und Entropie beschreibt. Diese Sichtweise halte ich insbesondere deshalb für vorteilhaft, weil die Beschreibung der Oberflächenspannung durch Kräfte viele Missverständnisse und Fehlvorstellungen generieren kann.

Dennoch ist bei diesen Phänomenen, bei denen es sich um Anziehung und Abstoßung handelt, eine Beschreibung durch Kräfte (meiner Erfahrung nach insbesondere für Studierende) sehr nahe liegend. Um beide Ansätze zu verdeutlichen, muss zu Beginn die Frage beantwortet werden,

⁹Die Untersuchungen einiger Gruppen von Studierenden gingen in diese Richtungen.

¹⁰Auch dieser Aspekt wurde später von Studierenden untersucht.

welche Kräfte zwischen Flüssigkeitsteilchen¹¹ wirken und welche Energien diese besitzen. Die Tatsache, dass es überhaupt stabile Materie gibt zeigt, dass es sich um einen Gleichgewichtszustand mit der Umgebung handeln muss. Energetisch muss sich dieser Gleichgewichtszustand durch ein Minimum der potentiellen Energie aller beteiligten Teilchen äußern. Ein stabiler Zustand zwischen zwei Teilchen einer Flüssigkeit resultiert aus einer Überlagerung einer abstoßenden und anziehenden Wirkung. Da die Flüssigkeitsteilchen nach außen hin neutral geladen sind, kann es sich bei den wirkenden Kräften nicht um Coulomb-Kräfte handeln.

Der anziehende Beitrag resultiert aus einer Deformierung der Elektronenhülle durch Annäherung. Näherungsweise kann man sich vorstellen, dass dadurch zwei elektrische Dipole induziert werden. Diese anziehende Kraft nennt man auch „Van der Waal'sche Kraft“, die im Vergleich zur Coulomb-Kraft sehr schwach ist. Der abstoßende Beitrag lässt sich quantenmechanisch durch das Pauli-Prinzip erklären. In Vergleich zur Van-der-Waals Kraft ist dieser Beitrag deutlich kurzreichweitiger.

3.3.2. Beschreibung der Oberflächenspannung durch Kräfte

Nun soll ein Zusammenhang zwischen den Begriffen Kraft und Oberflächenspannung hergestellt werden. Leider ist dies nicht ganz so einfach, denn in vielen (leider auch neuen) Schul- und Lehrbüchern (z.B. [21, 82]) weist die Beschreibung der Oberflächenspannung im Zusammenhang mit Kräften Fehler auf. Traditionellerweise wird folgendermaßen argumentiert:

Die Moleküle innerhalb der Flüssigkeit ziehen sich gegenseitig von allen Seiten gleich stark an. Es gibt daher einen Gleichgewichtszustand. Da die Moleküle an der Oberfläche auf einer Seite weniger stark angezogen werden, resultiert daraus eine nach innen wirkende Kraft. Die Moleküle seien deshalb bestrebt, nach innen zu wandern, und die Oberfläche stehe deshalb unter Spannung.

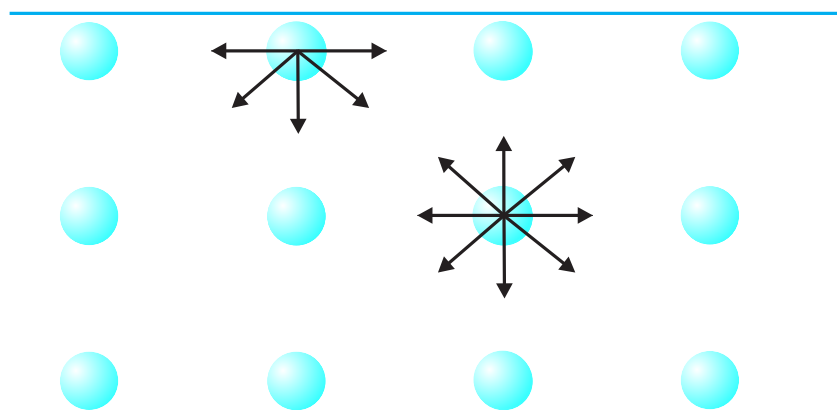


Abbildung 3.17.: In der Literatur gängige, aber falsche Darstellung der Kräfteverhältnisse innerhalb und an der Oberfläche von Flüssigkeiten.

Bereits im vorangegangenen Abschnitt wurde bemerkt, dass zwischen Molekülen aufgrund ihres Gleichgewichtszustandes mit der Umgebung sowohl Anziehungs- als auch Abstoßungskräfte

¹¹In diesem Zusammenhang halte ich eine Unterscheidung zwischen Atomen oder Molekülen nicht für nötig, sondern ich spreche allgemein von Flüssigkeitsteilchen, die nach außen hin neutral geladen sein sollen.

wirken. Gäbe es keine Abstoßung, so würde die Materie in sich zusammenstürzen und ein Gleichgewichtszustand wäre unmöglich. Die Moleküle ziehen sich zwar von allen Seiten gleich stark an, aber diese Wechselwirkung ist nur sehr kurzreichweitig und vor allem abstandsabhängig. Daher würde ein Molekül bei der kleinsten Verschiebung eine Kraft weg vom Gleichgewichtspunkt erfahren. Das System wäre völlig instabil. Es kann auch keine resultierende, nach innen gerichtete Kraft geben, denn sonst würde die Oberfläche nach innen beschleunigt. Es wird in vielen Fällen angenommen, dass ein Molekül innerhalb der Flüssigkeit von allen Nachbarn gleich stark angezogen wird. Dabei wird ein System beschrieben dass unter „Zug“ steht. Tatsächlich ist sogar das Gegenteil der Fall: Eine Flüssigkeit befindet sich unter (hydrostatischem) Druck. Es reicht in diesem Zusammenhang nicht aus, neben den nach innen gerichteten Kräften einfach zusätzliche abstoßende Kräfte einzuführen, die für Stabilität sorgen sollen, denn in jedem Fall muss die Erklärung der Oberflächenspannung aus einer resultierenden **aller** beteiligten Kräfte folgen. Eine Abtrennung der Anziehungskräfte zur Erklärung der Spannung ist deshalb nicht zulässig, da gleichzeitig aufgrund der abstoßenden Kräfte die Oberfläche unter Druck stehen müsste [94].

Hier wird aus meiner Sicht eindrucksvoll deutlich, wie viele Schwierigkeiten mit der Beschreibung der Oberflächenspannung durch Kräfte verbunden sind. Manche davon lassen sich umgehen, wenn man stattdessen mit Hilfe der Energie argumentiert.

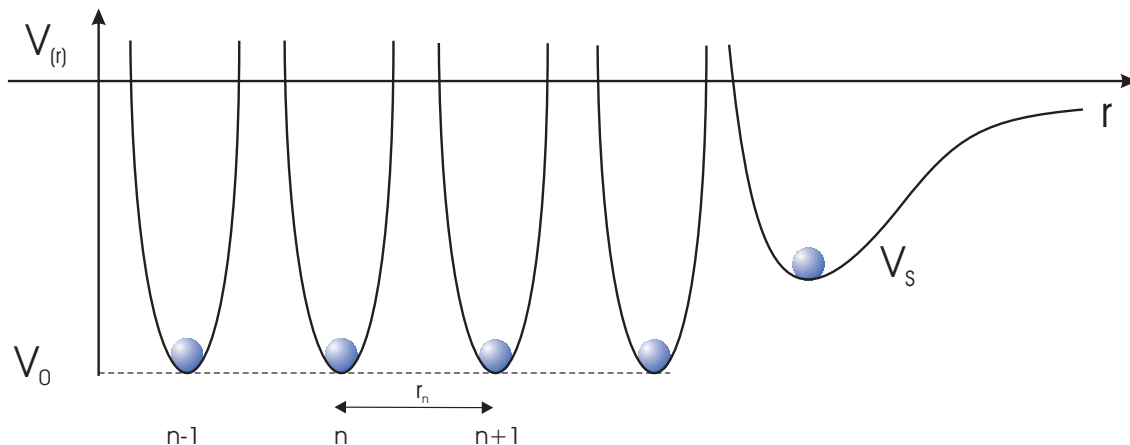


Abbildung 3.18.: Potentielle Energie innerhalb der Flüssigkeit und an der Oberfläche. Der Abstand r verläuft senkrecht zur Flüssigkeitsoberfläche. Die potentielle Energie eines Teilchens an der Oberfläche (ganz rechts) ist größer als die der anderen Teilchen (Der Übergangsbereich sei vernachlässigt). Man beachte: Der Potentialverlauf wird an der Oberfläche nicht nur höher, sondern auch flacher. Das kommt daher, dass die Kopplung der Teilchen untereinander an der Oberfläche kleiner ist als innerhalb der Flüssigkeit.

3.3.3. Oberflächenspannung und Energie

Befindet sich ein Flüssigkeitsteilchen an der Oberfläche einer Flüssigkeit, so ist die Energie, die zum Entfernen des Teilchens aus der Flüssigkeit nötig ist, kleiner als wenn sich das Teilchen tief in der Flüssigkeit aufhält. Daraus resultieren Phänomene wie z.B. die „Verdunstung“. Die potentielle Energie eines Teilchens innerhalb der Flüssigkeit ist deshalb kleiner als die Energie

eines Teilchens direkt an der Oberfläche¹². Dies ist eine Folge der geringeren Zahl an Nachbar-
teilchen an der Oberfläche. Es gibt einen Übergangsbereich in Oberflächennähe, in dem sich die
potentielle Energie vergrößert. Dadurch ist es für Teilchen an der Oberfläche wahrscheinlicher,
dass sie die Flüssigkeit verlassen können. Um ein Teilchen aus den Innern einer Flüssigkeit an
deren Oberfläche zu bringen und diese dadurch zu vergrößern, ist deshalb Energie nötig.

$$\partial E = \sigma \partial A \quad (3.4)$$

Die Proportionalitätskonstante σ bezeichnet man als „Oberflächenspannung“. Aufgrund der
Tatsache, dass jedes System, welches sich selbst überlassen wird, in den Zustand kleinster
Gesamtenergie strebt, und dass zur Vergrößerung der Flüssigkeitsoberfläche Energie nötig ist,
strebt die Flüssigkeit den Zustand der minimalen Oberfläche an. Gleichung (3.4) beschreibt den
Zusammenhang zwischen einer Oberflächenvergrößerung und der dazu benötigten Energie.

3.3.4. Grenzflächenenergie und Benetzung

Bisher wurde stillschweigend vorausgesetzt, dass sich oberhalb der Flüssigkeit Vakuum befindet.
Dies ist natürlich in der Realität nicht der Fall. Befinden sich z.B. Luftmoleküle oberhalb einer
Flüssigkeitsoberfläche, so beeinflussen diese die Bindungsverhältnisse innerhalb der obersten
Flüssigkeitsschichten. Bei Gasen ist dieser Einfluss noch sehr gering. Im Falle einer Grenzfläche
Flüssigkeit/Festkörper wird dieser Einfluss jedoch relevant. Die Dichten beider Substanzen sind
dann von gleicher Größenordnung und die Oberflächenteilchen beider Phasen üben beträch-
tliche Kräfte aufeinander aus. Wird die Oberfläche vergrößert, so muss dazu Energie aufgebracht
werden (Grenzflächenenergie). Diese ist maßgeblich für die Ausbildung von Tropfenformen ver-
antwortlich. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass hierbei ein Zusammenspiel dreier Grenz-
flächen vorliegt (fest/flüssig, flüssig/gasförmig und fest/gasförmig), in dem die Ausbildung der
Tropfenform von allen drei Grenzflächenenergien abhängt.

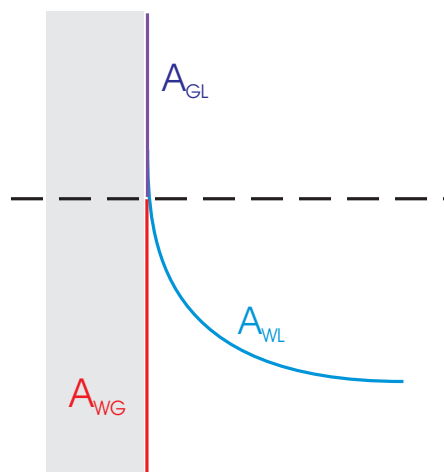


Abbildung 3.19.: Bei Flüssigkeitsbenetzung einer Wand entstehen drei Grenzflächen.

¹²Dabei wird die potentielle Energie negativ definiert. Die potentielle Energie wird Null, wenn das Teilchen aus der Flüssigkeit entfernt wird.

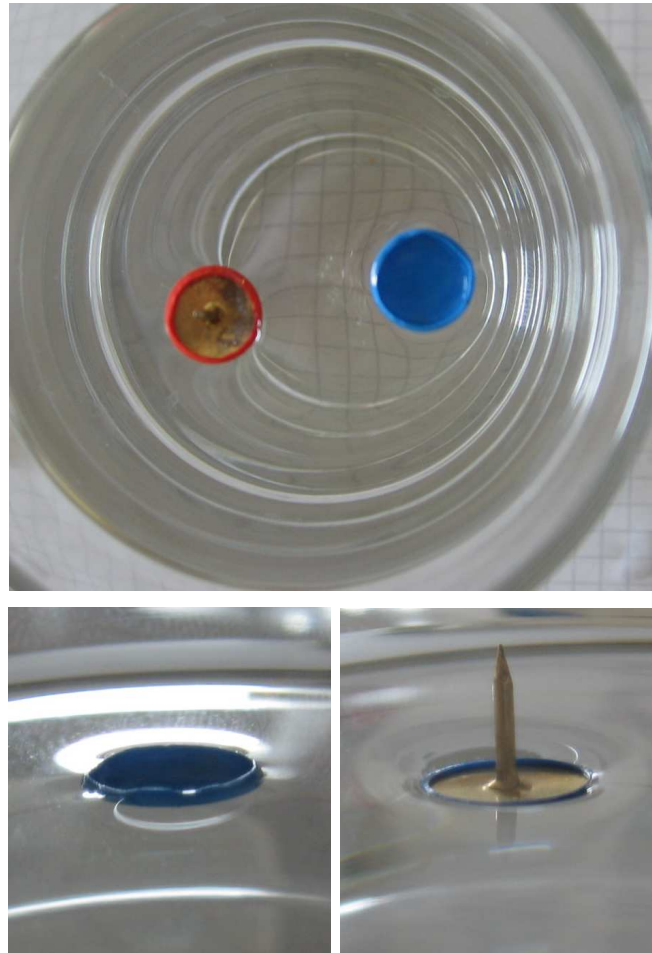


Abbildung 3.20.: **Oben:** Verschiedene Formen von Minisken lassen sich in einem Wasserglas mit kariertem Papier als Unterlage sichtbar machen.

Unten links: Ausbildung von konkaven Minisken bei einer Schutzkappe.

Unten rechts: Ausbildung von konvexen Minisken bei einer Heftzwecke.

Nun sollen die wirkenden Kräfte bei senkrechten Grenzflächen betrachtet werden. Die Benetzung eines auf der Wasseroberfläche schwimmenden Gegenstandes lässt sich durch äußere Kräfte beeinflussen. Die Ausbildung von Minisken ist eine Folge der Oberflächenenergien der Grenzflächen zwischen Gegenstand, Wasser und Luft. Jede der drei vorhandenen Oberflächen Wasser/Glas A_{WG} , Glas/Luft A_{GL} und Wasser/Luft A_{WL} ist bestrebt, sich zu minimieren. Bei einem konkaven Miniskus ist die Grenzflächenenergie Wasser/Gegenstand A_{WG} kleiner als die von Glas und Luft A_{GL} . Die Energiedifferenz wird durch die potentielle Energie des angehobenen Wassers und durch die Vergrößerung der Grenzflächenenergie zwischen Wasser und Luft (Oberfläche A_{WL}) kompensiert. Man kann auch anstelle der Grenzflächenenergien mit den Kräften argumentieren, die die Oberflächen zu minimieren versuchen (siehe dazu [8]).

Die Ausbildung unterschiedlicher Minisken an Körpern lässt sich in einem Wasserglas sehr einfach demonstrieren. Man legt ein kariertes Stück Papier unter ein mit Wasser gefülltes Glas und blickt senkrecht von oben auf die Flüssigkeitsoberfläche. Je nach Form des Miniskus wird das Muster auf dem Papier unterschiedlich verzerrt (Abb. 3.20).

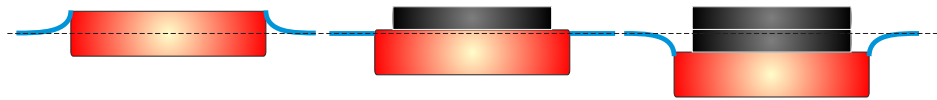


Abbildung 3.21.: Die Ausbildung von konkaven (links) und konvexen (rechts) Menisken bei Belastung eines schwimmenden Körpers durch zusätzliche Masse.

3.3.5. Heftzwecken und Schutzkappen an der Flüssigkeitsoberfläche

Wie kommt es nun zu den anziehenden und abstoßenden Wirkungen zwischen den Heftzwecken und Schutzkappen?

Aufgrund des größeren Gewichts der Heftzwecken bildet sich bei den Heftzwecken ein konvexer Miniskus aus, während sich bei den Schutzkappen ein konkaver Miniskus ausbildet (vgl. Abb. 3.21). Wie in Abschnitt 3.3.3 beschrieben, ist die Flüssigkeit bestrebt, ihre Oberfläche zu minimieren. Diese Tatsache ist es, die letztendlich zu den unterschiedlichen Verhaltensweisen von Heftzwecken und Schutzkappen auf der Oberfläche führt. In Abbildung 3.22 werden die möglichen Situationen erläutert: Abbildung 3.22 Mitte zeigt die Ausbildung der Miniskenformen bei einer Heftzwecke und einer Schutzkappe. Kommen sich zwei Heftzwecken oder zwei Schutzkappen mit gleichen Miniskenformen näher, so wird die Flüssigkeitsoberfläche verkleinert (Abb. 3.22 Oben und Mitte). Es kann also durch Zusammenbringen ein günstigerer Energiezustand erreicht werden¹³. Kommen sich eine Heftzwecke und eine Schutzkappe näher, so vergrößert sich die dazwischen liegende Flüssigkeitsoberfläche aufgrund der unterschiedlichen Miniskenformen¹⁴. Um beide Partner noch näher aneinander zu bringen, müsste deshalb zusätzlich Energie aufgebracht werden – oder: Beide Partner sind merklich bestrebt, sich voneinander zu entfernen. Es sei angemerkt, dass bei dieser Argumentation davon ausgegangen wird, dass die Minisken eine endliche Ausdehnung besitzen. Das bedeutet: Oberhalb eines gewissen Abstandes auf der Oberfläche „merken die Heftzwecken und die Schutzkappen nichts von einander“. Tatsächlich ist diese Betrachtung nur eine Näherung, denn legt man eine einzelne Heftzwecke in ein (nicht vollständig) mit Wasser gefülltes Glas, so bewegt sie sich immer in die Mitte.

Die Argumentation kann genauso für die Partner Heftzwecke/Rand und Schutzkappe/Rand durchgeführt werden. In ersten Fall (Heftzwecke/Rand) besitzen beide Partner unterschiedlich geformte Minisken. Sie stoßen sich daher ab. In zweiten Fall (Schutzkappe/Rand) wird die Schutzkappe vom Rand angezogen (und umgekehrt), da ihre Minisken gleich geformt sind. Wird ein Glas vollständig bis über den Rand mit Wasser gefüllt, so ändert sich das Verhalten der Körper. Während sich die Heftzwecken im nicht vollständig gefüllten Glas vom Rand abstoßen, werden sie im bis über den Rand gefüllten Glas von diesem angezogen. Die Schutzkappe verhält sich genau umgekehrt. Die Minimierung der Oberfläche zwischen den Körpern führt je nach Fall zu anziehendem oder abstoßendem Verhalten der Körper. Dies wird in den nachfolgenden Tabellen für die verschiedenen Fälle beschrieben.

¹³Die Ausbildung der Minisken ist eine Folge des Zusammenspiels der Auftriebskraft und der Grenzflächenkräfte.

¹⁴Für eine ausführlichere Diskussion verweise ich auf [76].

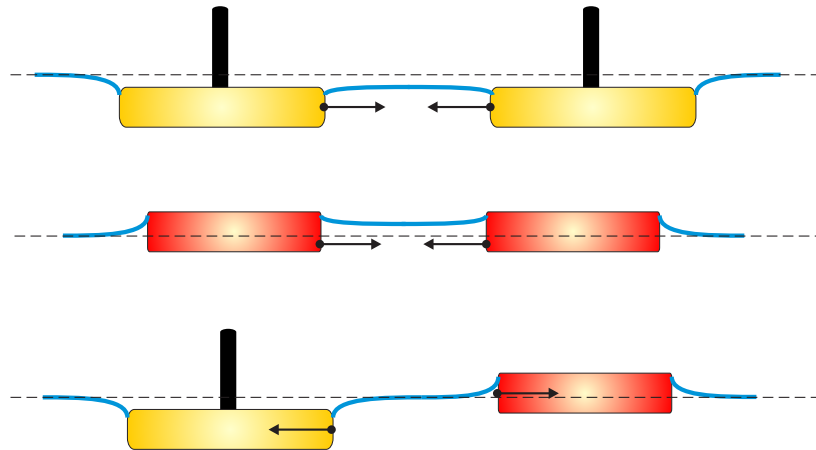


Abbildung 3.22.: Abstoßende und anziehende Kraftwirkung durch unterschiedliche Miniskenbildung. Die angreifenden Kräfte werden durch die schwarzen Pfeile dargestellt.

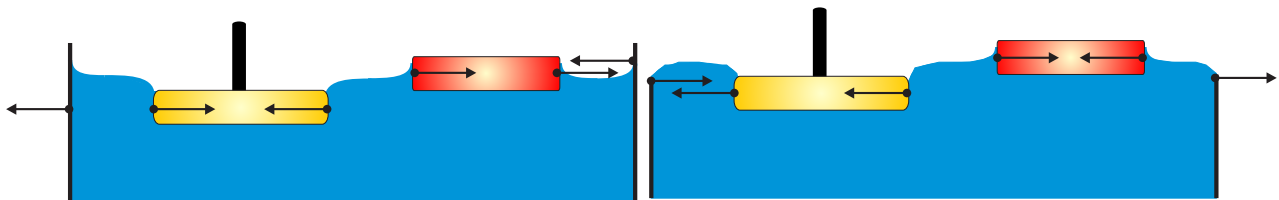


Abbildung 3.23.: Anziehung und Abstoßung von Heftzwecken und Schutzkappen an der Oberfläche für ein nicht vollständig gefülltes Glas (links) und ein vollständig bis zum Rand gefülltes Glas (rechts).

3.3.6. Erfahrungen im Seminar

3.3.6.1. Vorführung des Phänomens und erste Beobachtungen

Zur Vorführung des Phänomens benutzte ich ein 500ml Becherglas, welches etwa zu zwei Dritteln mit Wasser gefüllt wurde. Ich demonstrierte (kommentarlos) die sichtbaren Phänomene (Punkt 1 bis 5 in Abschnitt 3.3). Die Teilnehmer beobachteten das Verhalten der Heftzwecken und der Schutzkappen sehr genau. Eine Gruppe von Studierenden hat offenbar bereits in dieser Anfangsphase etwas genauer hingeschaut:

Studierende:

Außerdem kann man bei genauer Beobachtung noch Folgendes feststellen:

1. Setzt man eine Heftzwecke auf die Wasseroberfläche, so schwimmt sie in einer kreisförmigen, konvexen Vertiefung der Oberfläche.
2. Setzt man eine Schutzkappe auf die Wasseroberfläche, so schwimmt sie auf einer kreisförmigen, konkaven Erhebung auf der Oberfläche.
3. Entlang des Becherglasrandes kann man eine konkave Erhebung der Wasseroberfläche feststellen.

	Heftzwecke	Schutzkappe	Rand
Heftzwecke	Anziehung	Abstoßung	Abstoßung
Schutzkappe	Abstoßung	Anziehung	Anziehung

Tabelle 3.3.: Heftzwecken und Schutzkappen im nicht vollständig gefüllten Wasserglas.

	Heftzwecke	Schutzkappe	Rand
Heftzwecke	Anziehung	Abstoßung	Anziehung
Schutzkappe	Abstoßung	Anziehung	Abstoßung

Tabelle 3.4.: Heftzwecken und Schutzkappen in einem bis über den Rand gefüllten Wasserglas.

3.3.6.2. Fragestellungen

Nach kurzer Zeit kristallisierte sich bei allen teilnehmenden Gruppen die folgende Leitfrage heraus:

Studierende: Wie kommt es zu den unterschiedlichen Anziehungs- und Abstoßungsverhalten zwischen den Heftzwecken und Schutzkappen?

In manchen Fällen kam auch die grundsätzliche Frage auf:

Studierende: Wieswegen schwimmen die Heftzwecken und die Plastikkappen?

Um dies zu beantworten müssen weitere Fragen mit Hilfe geeigneter Untersuchungen beantwortet werden. Einige Beispiele dazu sind:

Studierende: Wie ändert sich das Anziehungs- und Abstoßungsverhalten, wenn:

1. man verschiedene Gefäße verwendet?
2. man die Füllhöhe variiert?
3. man eine andere Flüssigkeit benutzt?
4. andere Objekte aus unterschiedlichem Material verwendet?
5. das Gewicht der Schutzkappen verändert? (Dieser Punkt kam erst später hinzu.)

Die Versuche wurden mit Gefäßen unterschiedlicher Durchmesser und Höhe wiederholt. Dabei stellte sich heraus, dass die Phänomene in allen Fällen beobachtbar sind. Sie unterscheiden sich jedoch, nach Aussagen der Gruppen, in der Stärke der Wechselwirkung. Eine Veränderung der Füllhöhe zeigte jedoch keine Veränderung der Beobachtungen, solange der Wasserspiegel nicht den Rand des Glases erreicht.

Studierende:

Hier bildet sich im Wasser eine gewölbte Kuppel aus, auf der unsere Objekte schwammen. Gleichzeitig kehrte sich die Wechselwirkung mit dem Rand um, so dass die Heftzwecken vom Rand angezogen

und die Kappen abgestoßen wurden.

Manche Gruppen experimentierten auch mit anderen Flüssigkeiten. Eine Gruppe führte die Untersuchungen mit Pflanzenöl durch, bei anderen (häufiger vorkommenden) Varianten wurde Spülmittel in das Wasser gegeben. In den meisten Fällen „schwammen“ die Gegenstände aufgrund der zu kleinen Oberflächenspannung praktisch nicht und sanken zu Boden.

3.3.6.3. Untersuchung der Wechselwirkungen

Einige der Teilnehmer brachten weitere Gegenstände von zu Hause mit, die sie auf der Wasseroberfläche schwimmen ließen. Dazu gehörten z.B. einige Deckel von Marmeladen oder Gurkengläsern und Tischtennisbälle. Dabei zeigte sich, dass auch bei anderen schwimmenden Gegenständen Anziehungs- und Abstoßungsphänomene beobachtet werden können.

All diese Untersuchungen hatten das gemeinsame Ziel herauszufinden, von welchen Parametern das Anziehungs- und Abstoßungsverhalten abhängig ist. Eine andere, mit gleicher Häufigkeit formulierte Fragestellung zielte auf deren Ursache. Aus Sicht der Studierenden kamen zunächst nur zwei mögliche Ursachen für das Anziehungs- und Abstoßungsverhalten in Frage.

1. Spielen Elektrostatik oder Magnetismus bei diesem Phänomen eine Rolle?

Diese oder eine vergleichbare Fragestellung wurde von vielen Gruppen besonders zu Beginn ihrer Untersuchungen verfolgt. Es wurde untersucht, inwieweit ein Stabmagnet auf die Heftzwecken bzw. Schutzkappen einwirkt. Außerdem positionierte man Kompassnadeln in näherer Umgebung des Wasserglases. Da weder die Kompassnadeln eine Reaktion zeigten, noch die Heftzwecken (Messing) bzw. Schutzkappen (Kunststoff) merklich von dem Stabmagneten beeinflusst wurden, schlussfolgerte man daraus, dass die beobachteten Phänomene nicht durch Magnetismus begründbar seien. Um herauszufinden, ob es sich bei den beobachteten Wechselwirkungen um elektrostatische Effekte handelt, wurde folgendermaßen vorgegangen:

Studierende:

Wir setzten zunächst die Schutzkappe auf die Wasseroberfläche. Danach näherten wir das Ende eines Glasstabes an die Wasseroberfläche nahe der Schutzkappe an. So lange der Glasstab die Wasseroberfläche nicht berührte, war keine Wechselwirkung zwischen Glasstab und Schutzkappe zu beobachten.

Berührt der Glasstab die Wasseroberfläche, so wurde die Schutzkappe von dem Glasstab angezogen. Drückt man den Glasstab weiter in das Wasser hinein, so wird die Schutzkappe plötzlich wieder abgestoßen (wenn der Stab die Oberfläche durchdrungen hat). Aus den Experimenten schlussfolgern wir, dass

- es sich bei den unterschiedlichen Formen der Anziehung und Abstoßung zwischen den Heftzwecken, den Schutzkappen und dem Rand des Glases nicht um Elektrostatik oder Magnetismus handeln kann,
- es offenbar einen Zusammenhang zwischen dem „Druck“ auf die Wasseroberfläche und den beobachteten Anziehungs- und Abstoßungsphänomenen gibt.

Eine andere Gruppe versuchte die „Ladung“ der Heftzwecken mit einem Elektroskop zu messen. Dazu wurde eine ungeladene Metallkugel an das Elektroskop gebracht. Das Elektroskop schlug

nicht aus. Danach berührte man mit der Metallkugel zuerst die Heftzwecke und dann wieder das Elektroskop. Da das Elektroskop nach dieser Prozedur immer noch keinen Ausschlag zeigte, schlussfolgerte man daraus, dass die Heftzwecke nicht elektrisch geladen sei.

Die Teilnehmer vermuteten, dass es sich bei den beobachteten Phänomenen nicht nur um eine Eigenschaft der Heftzwecken bzw. der Schutzkappen handeln kann. Die Beschaffenheit der Wasseroberfläche trägt offenbar „in irgendeiner Form“ zu den Phänomenen bei. Aus diesem Grund standen von nun an neue Fragestellungen im Vordergrund.

2. Wie hängt das Anziehungs- und Abstoßungsverhalten der Heftzwecken und Schutzkappen mit der Form der Wasseroberfläche zusammen? und

3. Wie verändert sich die Wasseroberfläche beim Tragen des jeweiligen Körpers?

3.3.6.4. Untersuchung des Schwimmverhaltens und der Minisken

Ein Ansatz die oben gestellte Frage zu klären bestand darin, das Eintauchverhalten der Heftzwecken und Schutzkappe genauer zu untersuchen.

Studierende:

Experiment: Zwei Heftzwecken befinden sich auf der Oberfläche eines mit Wasser gefüllten Glases. Der Abstand wird langsam erhöht und geprüft, ob es immer noch zu einer Anziehungsreaktion kommt.

Beobachtung: Oberhalb einer Entfernung von 3cm findet kaum Anziehung mehr statt. Kurz bevor sie sich berühren (ca. 0,5cm) findet eine starke Beschleunigung statt.

Experiment: Man füllt das Becherglas so lange, bis es zu einer konkaven Wölbung der Wasseroberfläche kommt.

Beobachtung: Die Heftzwecke treibt an den Rand des Becherglases (Anziehung!). Die Schutzkappe treibt auf die höchste Stelle in der Mitte des Becherglases.

Schlussfolgerung: Im Becherglas geht der Bereich der Wechselwirkung weit über den Bereich der visuell wahrnehmbaren Veränderung der Wasseroberfläche hinaus. Die Wasseroberfläche im (nicht bis zum Rand gefüllten) Glas ist nicht eben, sondern konkav.

An dieser Stelle rückte das Eintauchverhalten der Heftzwecken und der Schutzkappen in den Focus der weiteren Untersuchungen. Ein erster Versuch bestand darin, die Gegenstände leicht mit einem Draht hinunter zu drücken. Dabei zeigte sich ein anderes Verhalten.



Abbildung 3.24.: Untersuchungen des Eintauchverhaltens und der Bildung von Minisken bei den Heftzwecken und Schutzkappen. Bei einer Blickrichtung senkrecht von oben in das Glas kann man anhand der Verzerrungen des Untergrundes in einer Umgebung der Heftzwecken oder Schutzkappen auf die Form der Minisken schließen.

Studierende:

Dann drückten wir die Schutzkappen mit einem Draht hinunter und konnten feststellen, dass die Kappe Heftzwecken anzieht und Kappen abstößt, sobald sie sich unter der Wasseroberfläche befindet (aber nicht ganz untergetaucht ist).

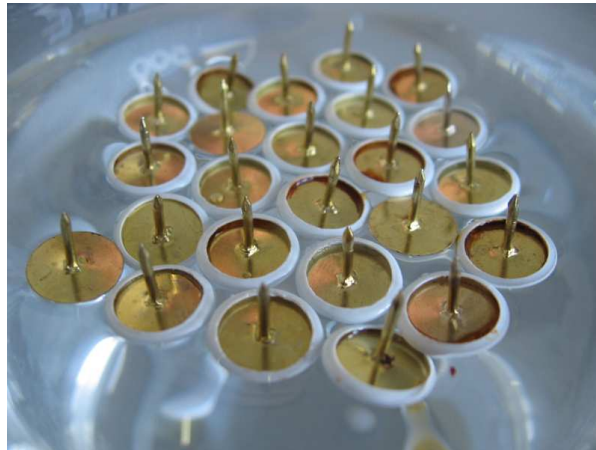


Abbildung 3.25.: Studierende erzeugten eine hexagonal dicht gepackte Struktur, indem sie sehr viele Heftzwecken in das Wasser legten.

Dieselben Beobachtungen machten auch andere Gruppen, die die Schutzkappen beispielsweise mit Sand- oder Salzkörnern beschwerten. Dabei muss sehr vorsichtig vorgegangen und sehr genau beobachtet werden. Den Seminarteilnehmern viel auf, dass Heftzwecken und Schutzkappen im Wasser unterschiedliche Minisken ausbilden und dass diese sich durch Beschweren beeinflussen lassen. Die Minisken wurden in der Regel durch Fotos dokumentiert. Dies geschah entweder durch Nahaufnahmen der Heftzwecken oder durch Beobachten der Flüssigkeitsoberfläche von oben (Abb. 3.24 rechts). Je nach Miniskus „verzerrt“ sich der durch das Wasser sichtbare Un-

tergrund des Glases in direkter Umgebung des Gegenstandes (siehe auch Abb. 3.20 links). Legt man sehr viele Heftzwecken auf die Wasseroberfläche so entsteht eine Hexagonal dicht gepackte Struktur.

Studierende:

Heftzwecken haben einen konvexen Miniskus, da sie leicht unter der Wasseroberfläche schweben. [...] Die Kappen hingegen schwimmen auf dem Wasser, sodass das Wasser (wie am Rand) ein Stück nach oben gezogen wird und so einen konkaven Miniskus ausbildet. [...] Außerdem sieht man, dass sich gleiche Minisken anziehen und verschiedenartige abstoßen. Physikalische Objekte streben dem Niveau der kleinsten Energie entgegen, also im Fall der Wasseroberfläche findet eine Minimierung statt. Daher ziehen sich auch gleiche Minisken an, da sie dadurch die Oberfläche weiter verkleinern können.

Nach meinen Erfahrungen gelingt es der Mehrheit aller teilnehmenden Gruppen, am Ende ihrer experimentellen Tätigkeiten eine Erklärung in dieser oder ähnlicher Form zu liefern. Dabei ist entscheidend, dass die Form der Wasseroberfläche (die Minisken) letztendlich für die Anziehungs- und Abstoßungsreaktionen verantwortlich ist. Eine andere Erklärung ist von folgender Art:

Studierende:

Frage: Warum stoßen sich Heftzwecke und Schutzkappe ab?

Erklärung: Wird die Plastikkappe in Richtung der Heftzwecke gestoßen, so nähern sich diese zwar an, berühren sich jedoch nicht, da sich aufgrund der veränderten Wasseroberfläche eine Art „Bugwelle“ ausgebildet hat und sich die beiden Gegenstände abstoßen.

Mit der so genannten „Bugwelle“ ist hier der konkave Miniskus gemeint. Dabei wird offensichtlich nicht berücksichtigt, dass sich der Miniskus auch bei dem unbewegten Gegenstand ausbildet, während sich hingegen eine Bugwelle nur im bewegten Zustand ausbilden kann.

3.3.7. Übersicht über die Aspekte des Phänomens

An dieser Stelle sind noch einmal alle Aspekte zusammengefasst, die das Phänomen „schwimmende Heftzwecken“ bietet und welche davon von den Studierenden bearbeitet wurden.

3.3.8. Zusammenstellung der von mir bereitgehaltenen Materialien

Folgende Materialien wurden von mir im Rahmen des Seminars bereitgehalten.

1. Heftzwecken mit Plastikschrutzkappen,
2. Gefäße unterschiedlicher Größe, darunter Bechergläser, zylindrische Rundkolben, Trinkgläser und ein großes Aquarium,
3. Stabmagnete und Kompassnadeln,
4. Glas- und Kunststoffstäbe,
5. Deckel von Marmeladengläsern (kam später von den Studierenden hinzu),

Aspekt des Phänomens	wurde näher untersucht
Warum schwimmen die Heftzwecken?	ja
Verschiedene Gefäße	ja
Füllhöhe variieren	ja
Gefäß bis zum Rand voll Wasser	teilweise
Andere (schwimmende) Gegenstände	ja
Andere Flüssigkeiten z.B. Öl	teilweise
Wasser mit Spülmittel versetzt	ja
Beschweren der Heftzwecken mit Sand, Salz oder Zucker	ja
Elektrostatische Untersuchungen	ja
Messung von Ladungen mit Elektroskop	einmal
Magnetostatische Untersuchungen	ja

Tabelle 3.5.: Zusammenstellung aller Aspekte des Phänomens „schwimmende Heftzwecken“, die von den Seminarteilnehmern beobachtet und untersucht wurden.

6. Tischtennisbälle (kam später von den Studierenden hinzu),

7. Elektroskop (PHYWE)

3.3.9. Fazit

Bei den „schwimmenden Heftzwecken“ handelt es sich um ein Phänomen, welches die Seminarteilnehmer zu genauen Beobachtungen geradezu herausfordert. Das Phänomen bietet viele Möglichkeiten der Variation (Schwimmen von Heftzwecke/Heftzwecke oder Heftzwecke/Schutzkappe), die offenbar aus Sicht der Teilnehmer immer noch überschaubar genug sind. Die wesentlichen theoretischen Aspekte (Elektrostatik, Magnetismus oder Oberflächenspannung) sollten den Studierenden aus ihren Grundvorlesungen geläufig sein. Nach meinen Erfahrungen wird das Phänomen als „Ausgangsphänomen“ von den Studierenden gern angenommen. Sie haben offenbar nicht das Gefühl, sofort quantitative Messungen durchführen zu müssen. Die Tatsache, dass von Beginn an ein hohes Maß an aufmerksamen Beobachtungen erforderlich ist, führt zu einer intensiven Auseinandersetzung mit vielen einzelnen Aspekten des Phänomens (Welche Materialien schwimmen, wie verhalten sich die Heftzwecke/Kappe am Rand/untereinander unter verschiedenen Bedingungen...). Es kam oft vor, dass Gruppen in eine „experimentelle Sackgasse“ liefen, wenn sie z.B. zu Beginn davon ausgingen, dass das Phänomen auf elektrostatischen Ursachen beruht. Dies wurde jedoch nach eigenen Aussagen der Teilnehmer nicht als negativ empfunden.

Studierende:

Normalerweise führt man im naturwissenschaftlichen Schulunterricht nur Experimente durch, die zu einem konkreten Ziel hinführen. Beim den Heftzwecken ist es auch uns passiert, dass wir versucht haben etwas mit einem Experiment zu zeigen, was gar nicht damit zu beweisen war (Elektrostatik/Magnetismus).

Daher halte ich insgesamt dieses Phänomen besonders für einen Einstieg in eine offene Experimentierweise für geeignet.

3.4. Fazit der Erprobungsversuche

Die ersten Erprobungsversuche haben gezeigt, dass die Studierenden Beobachtungen anstellen, Fragestellungen formulieren und experimentelle Strategien zu deren Klärung suchen und anwenden. Welche Schlussfolgerungen können nun aus dieser ersten Erprobungsphase gezogen und im Hinblick auf die Suche nach weiteren neuen Ausgangsphänomenen berücksichtigt werden? Ich ging davon aus, dass die Studierenden zu Beginn des Seminars praktisch keine Erfahrungen bezüglich offener Experimentiersituationen besitzen. Daher sollten sie es nicht ohne weiteres gewohnt sein, eigene experimentelle Beobachtungen anzustellen und Fragestellungen zu formulieren.

Aus diesem Grund sollte das zu Beginn des Seminars ausgewählte Ausgangsphänomen eine überschaubare Zahl unterschiedlicher Untersuchungspfade eröffnen. Ansonsten kann eine zu große Zahl dazu führen, dass die Studierenden aufgrund der Vielzahl von Möglichkeiten ihre eigentlichen Ziele und Fragestellungen aus den Augen verlieren. „Welche Untersuchungen passen zu welchen Fragestellungen?“ und „Welche Strategien passen zu welchen Untersuchungen?“ Auf der anderen Seite zeigt sich (bei der Rollbahn), dass es von Nachteil sein kann, wenn das Phänomen von den Teilnehmern zu schnell durchschaut wird.

Das Ausgangsphänomen, welches zu Beginn des Seminars von den Studierenden bearbeitet wurde, sollte ganz besonders die „physikalische Beobachtungen“ herausfordern. Nach meiner Erfahrung neigen Studierende schnell dazu, quantitative Messungen durchzuführen. Das Phänomen sollte so geschaffen sein, dass quantitative Messungen (wenigstens am Anfang) eine eher untergeordnete Rolle spielen, damit Tätigkeiten wie das Variieren von Parametern oder das Herauspräparieren eines Untersuchungsgegenstandes in den Vordergrund treten.

Die Erprobungsversuche zeigen auch, dass ein zunächst sehr einfach erscheinendes Ausgangsphänomen schnell auf (z.B. messtechnische) Schwierigkeiten seitens der Teilnehmer führen kann (Abschnitt 3.1.1.5). Dieser Schwierigkeiten muss sich der Lehrende bewusst sein, um angemessen darauf reagieren zu können. Bei der Auswahl neuer Ausgangsphänomene sind demnach folgende Punkte zu beachten:

- Das Vorhandensein von nur wenigen möglichen unterschiedlichen Aspekten oder Untersuchungspfaden muss noch nicht unbedingt ein Nachteil bedeuten. Das Phänomen sollte aber auch nicht zu schnell durchschaubar sein.
- Das Phänomen sollte die Teilnehmer zum Beobachten herausfordern. Je mehr Beobachtungen gemacht und Aspekte gefunden werden können, desto schwieriger kann sich ihre Einordnung in den Untersuchungszusammenhang darstellen.
- Das Phänomen sollte implizit darauf aufmerksam machen, dass beim Experimentierprozess nicht nur quantitative, sondern auch qualitative Resultate von hohem Wert sein können.

Die rotierende (Farb-) Scheibe

4.1. Beschreibung des Phänomens

Dem Phänomen der rotierenden Farbscheibe bin ich zum ersten Mal in der Science-Ausstellung „Phaeno“ in Wolfsburg begegnet. Man findet es aber mittlerweile auch in anderen Einrichtungen dieser Art (z.B. Paris oder Winterthur). Eine um die vertikale Achse drehbar gelagerte runde Scheibe wird von einer für den Betrachter nicht unmittelbar sichtbaren Lichtquelle beleuchtet und wirft einen Schatten auf einen dahinter stehenden Schirm (Abbildung 4.1). Ein Elektromotor versetzt nun die Scheibe in eine schnelle Drehbewegung um ihre Längsachse, wobei die Drehzahl periodisch und kontinuierlich auf- und abgesenkt wird.

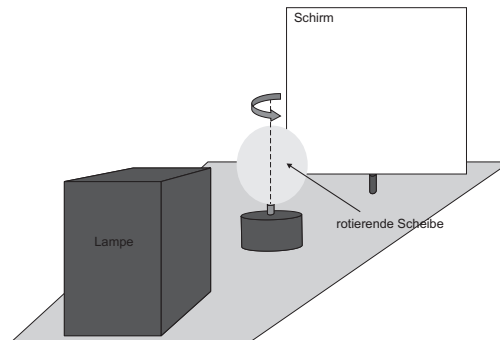


Abbildung 4.1.: Nachbau des Phänomens „rotierende Farbscheibe“. In der schwarzen „Black-Box“ befindet sich eine Lichtquelle. Die rotierende Scheibe wirft einen Schatten auf den dahinter stehenden Schirm.

Dabei beobachtet man sowohl auf der Scheibe als auch auf dem Schirm ständig wechselnde Farberscheinungen (Abbildung 4.2), die offensichtlich mit der Drehzahl der rotierenden Scheibe im Zusammenhang stehen. Steht die Scheibe still, so sind keine Farberscheinungen beobachtbar. Das Grundprinzip dieses Phänomens schien mir zunächst leicht durchschaubar zu sein. Eine für den Beobachter nicht sichtbare durchsichtige Farbscheibe, die mit hoher Drehzahl vor einer weißen Lichtquelle rotiert, könnte zusammen mit der sichtbaren rotierenden Kreisscheibe die Ursache für die Farberscheinungen sein. Dennoch faszinierte mich dieses Phänomen aufgrund

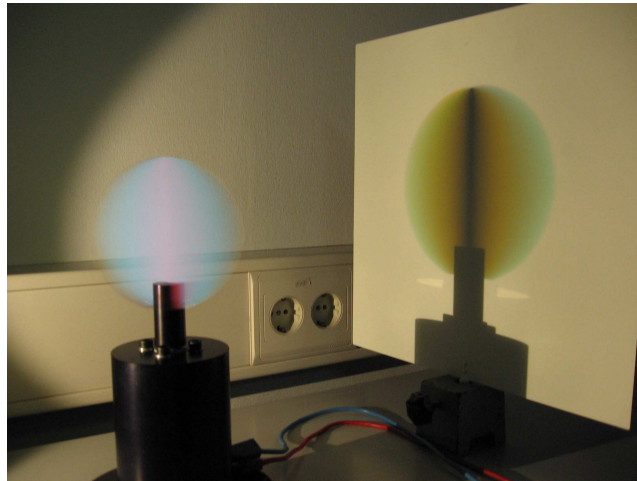


Abbildung 4.2.: Farbeindrücke des Schirm- und Schattenbildes einer schnell rotierenden Scheibe.

seiner Ästhetik so sehr, dass mir im Laufe der weiteren Beobachtung Fragen in den Sinn kamen:

1. Wie hängen die beobachteten Farben mit den Drehzahlen der rotierenden Scheiben zusammen?
2. Wie viele verschiedene Farben hat die rotierende Farbscheibe vor der Lampe und welche Farben sind dies?
3. Hängen die beobachteten Farben auf der Kreisscheibe in irgendeiner Weise von der Form der rotierenden Scheibe ab?
4. Welcher Zusammenhang besteht zwischen den beobachteten Farben auf der Kreisscheibe und den Farben auf dem Schirm?

Da sich schon nach kurzer Zeit eine Fülle verschiedener Fragen ergaben, schien mir dieses Phänomen ein mögliches Ausgangsphänomen für eine offene Untersuchung zu sein. Als erstes galt es, dieses Phänomen in einer Laborversion nachzubauen. Dies wurde von der Feinmechanikwerkstatt der Universität Duisburg-Essen übernommen. Die Farbscheibe, die von einem Elektromotor angetrieben wird, befindet sich zusammen mit einer Reuterlampe in einer schwarzen Box¹ (Abbildung 4.1). Die Kreisscheibe wird ebenfalls von einem Elektromotor angetrieben, der durch ein Netzgerät mit Gleichspannung versorgt wird. Während die Drehzahl der Kreisscheibe über die Spannung des Netzgerätes variiert werden kann, lässt sich die Drehzahl der Farbscheibe in der Box nicht verändern. Das Schattenbild der Scheibe kann entweder auf einen Schirm oder direkt auf eine weiße Wand projiziert werden. Dieser Aufbau ermöglicht es, anhand eigener experimenteller Untersuchungen Antworten auf die oben gestellten Fragen zu suchen.

4.2. Erste Phase eigener Untersuchungen

Bevor ich näher auf (meine) Fragestellungen und experimentellen Untersuchungen eingehe, möchte ich das Grundprinzip des Phänomens erläutern. Das Phänomen beruht auf der „ad-

¹Dadurch soll das zu Grunde liegende Funktionsprinzip der Anordnung für die Seminarteilnehmer nicht unmittelbar offensichtlich sein. Es soll aber mit nicht zu großem Aufwand möglich sein, die Box zu öffnen.

ditiven Farbmischung“. Bildet man zwei Kreise unterschiedlicher Farbe so auf einem Schirm ab, dass sie sich überlagern, entsteht in der Überdeckungszone eine neue Farbe. Es ergibt sich beispielsweise bei der Überdeckung der Farben Rot und Grün die neue Farbe Gelb. Der neue Farbeindruck ergibt sich dadurch, dass eine bestimmte Netzhautstelle gleichzeitig mit verschiedenen Farben beleuchtet wird. Additive Farbmischung lässt sich durch verschiedene Verfahren bewirken. Beispielsweise kann man auch dieselbe Netzhautstelle nicht gleichzeitig, sondern in einer schnellen Abfolge nacheinander mit verschiedenen Farben beleuchten. Die Trägheit des menschlichen Auges bewirkt einen konstanten Farbeindruck, wenn die Frequenz des Farbwechsels größer als 25 Hz ist.

Bei unserem Phänomen rotiert die Farbscheibe innerhalb der Box mit einer Frequenz von etwa 100 Hz (siehe Abbildung 4.6a) vor einer weißen Lampe. Da die Farbscheibe aus vier Farbsegmenten (Gelb, Blau, Rot, Grün) besteht, wird bei einem Umlauf nacheinander Licht in diesen vier Farben abgestrahlt. Die Trägheit des Auges bewirkt nun, dass der Betrachter das Licht in der Summe als gelbweiß empfindet. Dies kann qualitativ überprüft werden, indem man die Hand oder besser einen dünnen Gegenstand wie einen Bleistift schnell im weißen Schein des Lichts hin und her bewegt. Man beobachtet dann, dass die Hand von einem farbigen Saum umgeben wird (Abb. 4.3). In diesem Zusammenhang geben Schlichting und Suhr [77] Anregungen für solche Experimente an diesem Phänomen.

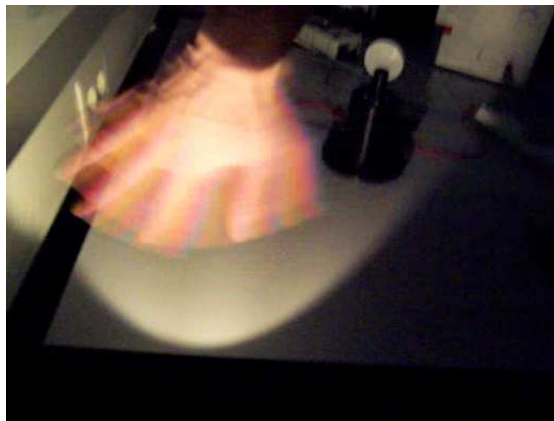


Abbildung 4.3.: Qualitativer Nachweis für die Zusammensetzung des weißen Lichts der Lampe aus verschiedenen Farbanteilen. Bei schneller Bewegung der Hand im Licht der Lampe, wird diese von einem farbiger Saum umgeben.

4.2.1. Komplementäre Farben auf der Scheibe und auf dem Schirm

Es lässt sich demnach qualitativ leicht zeigen, dass das „weiße“ Licht der Lampe durch additive Farbmischung entsteht und zwar durch eine schnelle Abfolge von Beleuchtungen mit unterschiedlichen Farben. Rotiert die Scheibe mit hoher Drehzahl, so werden bestimmte Punkte auf dem Schirm in einer bestimmten Zeit von der Scheibe verdeckt. Das von der Lampe in diesem Zeitpunkt abgestrahlte farbige Licht gelangt nicht auf den Schirm. Das auf dem Schirm sichtbare Licht ist daher nicht „weiss“, sondern es fehlt quasi dazu der Farbbeitrag, der von der Scheibe verdeckt wird. Es findet eine „Trennung“ der Farben statt. Die zu beobachtenden Farben auf der Scheibe und auf dem Schirm müssen in einer bestimmten Weise zusammenhängen.

Da einige dieser Farben auf der Scheibe und die restlichen auf dem Schirm abgebildet werden, sollte die Summe der beiden Farben auf Scheibe und Schirm weiß ergeben. Wie kann man dies experimentell überprüfen?

Moderne Bildbearbeitungsprogramme² sind in der Lage, die Farbe von einzelnen Punkten oder gesamten Bereichen eines Bildes zu erfassen und zu verarbeiten. Jede Farbe wird als Ortsvektor in einem dreidimensionalen Koordinatensystem³ dargestellt werden, dessen Achsen die drei Grundfarben (Rot, Grün, Blau) darstellen, da eine Mischfarbe durch Addition dieser drei Grundfarben gebildet wird [51].

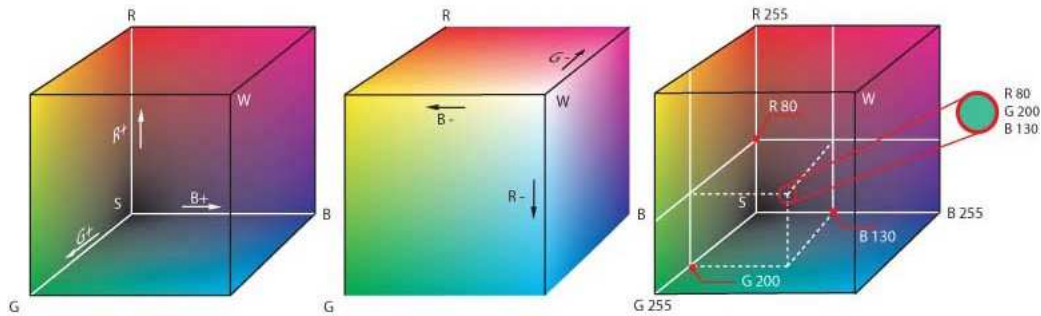


Abbildung 4.4.: RGB Farbwürfel (Bildquelle: Wikipedia 03/08)

Der Betrag eines Vektors in diesem Farbsystem ist ein Maß für die Farbintensität (Helligkeit). Bei vielen Bildbearbeitungsprogrammen ist es üblich, die Intensität pro Farbe auf einer Skala von 0 bis 255 zu skalieren. Beispielsweise haben die Farben Schwarz S und Weiss W in diesem System die Darstellungen:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{W} = \begin{pmatrix} 255 \\ 255 \\ 255 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Die Summe zweier komplementärer Farben ergibt Weiß.

$$\vec{M} = \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad \vec{K}_M = \begin{pmatrix} 255 - R \\ 255 - G \\ 255 - B \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Der Zusammenhang zwischen einer Farbe und ihrer Komplementärfarbe wird in (4.2) dargestellt. Bei gegebener Farbe M lässt sich so die komplementäre Farbe K_M bestimmen. Diesen Prozess nennt man auch *Invertierung*.

Diese Invertierung kann von modernen Bildbearbeitungsprogrammen für ein gesamtes Bild vorgenommen werden. Dabei wird jeder Bildpunkt des Originalbildes gemäß (4.2) invertiert. Dies wird in Abbildung 4.5 für ein Foto des Versuchsaufbaus dargestellt: Links erkennt man die farbige Scheibe (Orange) und das Schattenbild auf dem Schirm (Türkis). Rechts die Invertierung, in der nun das Schattenbild orange und die Scheibe türkis gefärbt sind. Die beiden Farbtöne im Originalbild von Scheibe und Schattenbild scheinen demnach komplementär zueinander zu sein.

²Innerhalb dieser Arbeit verwende ich Corel Draw und Corel Photo Paint Version 13 (2007)

³Dieses System wird auch als RGB-Farbraum bezeichnet. Es gibt auch andere, äquivalente Darstellungen.

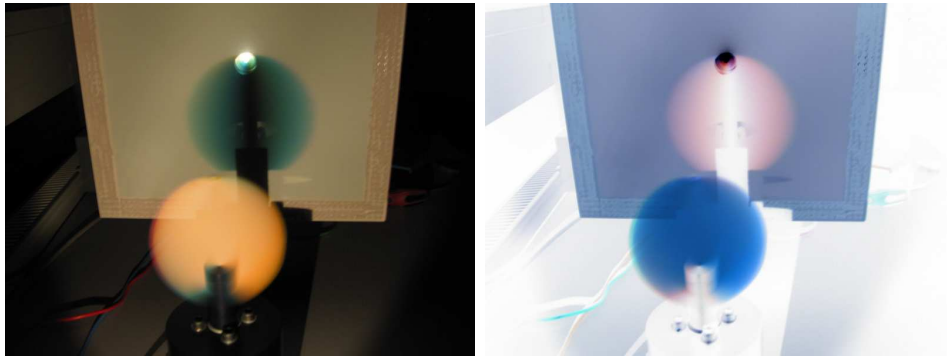


Abbildung 4.5.: Invertierung des Originalbildes zum Nachweis der komplementären Farben auf Scheibe und Schirm.

Links: Original

Rechts: Invertierung

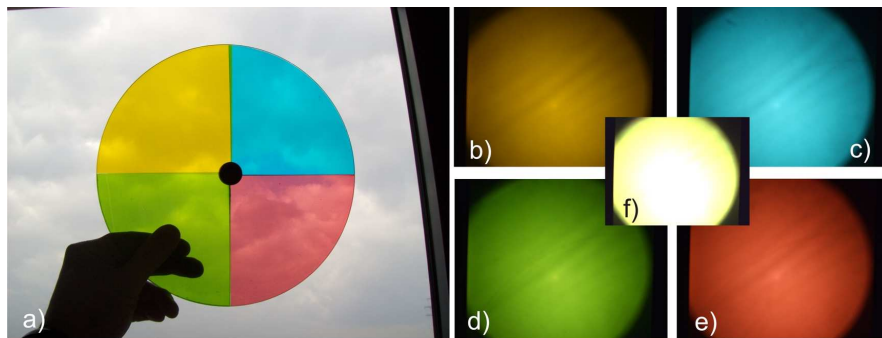


Abbildung 4.6.: a) Ansicht der Farbscheibe vor einem Fenster. b) bis e) Ausleuchtung der einzelnen Segmente der Farbscheibe durch eine Reuterlampe. Die Bilder zeigen einen ausgeleuchteten, transparenten Schirm. f) Numerische Addition aller Einzelbilder b) bis e) Die Summe entspricht einem hellen Gelbton.

Die einzelnen Farben der Farbscheibe ergänzen sich zu einem hellen Gelb-Weisston. Dies kann ebenfalls mit Hilfe der Bildbearbeitungssoftware verifiziert werden. Abbildung 4.6 a zeigt exemplarisch die Farbscheibe, wie sie vor ein Fenster gehalten wird. Die Darstellungen Abbildung 4.6 b-e daneben zeigen die Fotos eines transparenten Schirms mit der Ausleuchtung jedes einzelnen Segments durch eine Reuterlampe. Die Addition aller vier Einzelbilder ergibt einen hellen Gelbton (Abbildung 4.6f). Dies ist die helle gelbliche Ausleuchtung des Schirms, die man auch im Experiment beobachtet.

Zusammenfassend wurde dadurch in diesem Abschnitt experimentell gezeigt, dass das Licht der Lampe aus verschiedenen Farben besteht, die sich durch Addition zu Gelbweiss ergänzen. Die Farbeindrücke auf der Scheibe und im Schattenbild auf dem Schirm sind zueinander komplementär. Im nächsten Schritt soll nun verstanden werden, unter welchen Bedingungen es zu welchen Farbeindrücken auf der Scheibe und auf dem Schirm kommt.

4.2.2. Die durch Zusammenwirken von Farbscheibe und undurchsichtiger Scheibe entstehenden Farben

Die Färbung der rotierenden Scheibe und des Schattens auf dem Schirm ist maßgeblich von der Drehzahl der Scheiben abhängig. Interessant sind für mich nun die Fälle, bei denen ein konstanter Farbeindruck beobachtet werden kann. Erhöht man die Drehzahl der undurchsichtigen Scheibe langsam aus dem Stillstand heraus, so erhält man an einer bestimmten Frequenz einen stillstehenden Farbeindruck entsprechend Abbildung 4.7 links. Eine weitere Erhöhung der Drehzahl führt zunächst wieder zu einem Farbwechsel, der in eine weitere Graufärbung übergeht. Bis sich bei sehr hohen Drehzahlen ein weiterer, stillstehender Farbeindruck bildet (Abbildung 4.7 rechts).

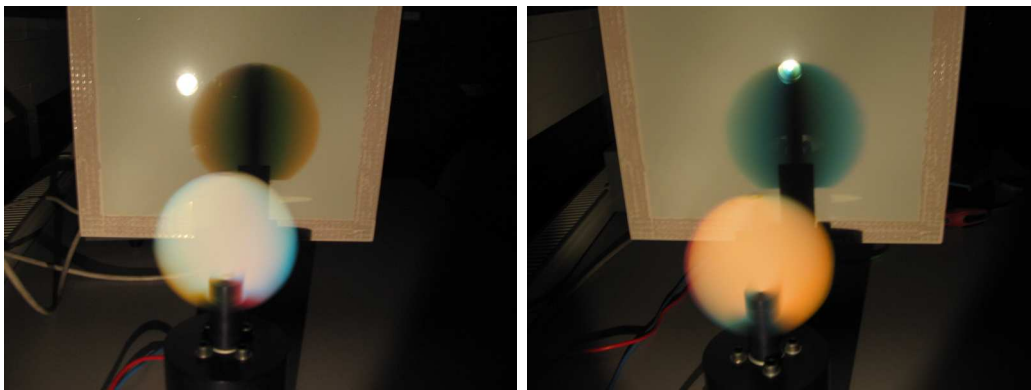


Abbildung 4.7.: **Links:** Die undurchsichtige Kunststoffscheibe rotiert mit halber Drehzahl der Farbscheibe.
Rechts: Beide Scheiben rotieren mit gleichen Drehzahlen.

Eine Vermutung, die sich im Laufe der qualitativen Untersuchungen herauskristallisierte, war dass der einfachste Fall des Farbverlaufs bei identischen Drehzahlen beider Scheiben zu beobachten ist. Ich gehe davon aus, dass Zusammenhänge, die in dieser Situation verstanden werden, sich auch auf allgemeinere Fälle übertragen lassen.

Um die Zusammenhänge zwischen Drehzahl und Farben untersuchen zu können, machen wir zunächst einige vereinfachende Annahmen.

1. Die rotierende Scheibe sei quadratisch.
2. Die rotierende Scheibe steht nur senkrecht oder parallel zum einfallenden Licht. Sie wird dadurch entweder vollständig ausgeleuchtet, oder gar nicht.
3. Die rotierende Scheibe hat die gleiche Drehzahl wie die Farbscheibe vor der Lampe.

Es wird sich später noch herausstellen, dass viele der von mir erst viel später beobachteten Phänomene allein mit diesen Annahmen nicht erklärbar sind. In Abbildung 4.7 rechts erscheint die Scheibe für uns in einem Orangeton und ihr Schattenbild auf dem Schirm in einem Türkistone, wenn beide Scheiben exakt die gleiche Drehzahl besitzen. Wie kommt es gerade zu diesen Farbtönen? Welche Farben beobachtet man, wenn die Drehzahlen nicht übereinstimmen? Das Licht der Reuterlampe, die stets nur einen kleinen Teil der rotierenden Farbscheibe ausleuchtet, dringt durch eine kleine runde Öffnung der Abdeckung aus der Lampe heraus. Diese

Öffnung wird in den Abbildungen 4.8 und 4.9 auf den farbigen Scheiben durch einen kleinen Kreis dargestellt. Das aus der Öffnung austretende Licht trifft nun auf die ebenfalls rotierende Kunststoffscheibe und wird dort je nach Stellung der Scheibe entweder auf den dahinter stehenden Schirm durchgelassen oder ausgeblendet (vgl. Abb. 4.8). Die Farben Orange und Türkis entstehen durch das Ausblenden bestimmter Farben durch die rotierende Kunststoffscheibe. Zu einem bestimmten Zeitpunkt hat die Kunststoffscheibe eine Position, in der sie das Licht ausblendet (Abb. 4.9 oben). Es gibt nun zwei mögliche Fälle.

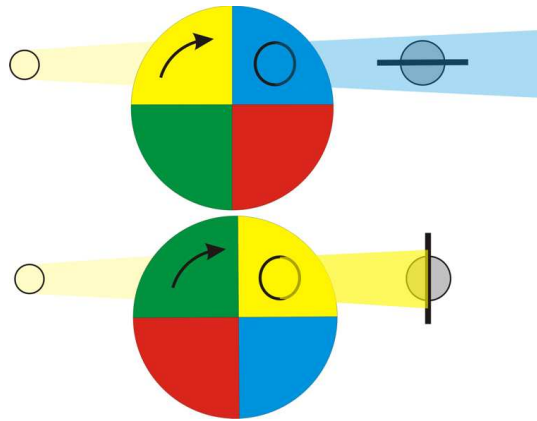


Abbildung 4.8.: Die rotierende Farbscheibe wird von hinten mit einer Reuterlampe durchleuchtet. Je nach Stellung der Kunststoffscheibe (Ansicht von oben) wird das farbige Licht auf den Schirm durchgelassen oder ausgeblendet.

Im ersten Fall befindet sich die Farbscheibe zu Beginn in der Position A. Im Laufe einer vollständigen Umdrehung der Kunststoffscheibe hat auch die Farbscheibe eine Umdrehung vollzogen (Abb. 4.9 A, B, C, D, A). Dabei erkennt man, dass nur die Farben Grün und Blau durchgelassen werden. Die Farben Gelb und Rot treffen auf die Scheibe. Im zweiten möglichen Fall befindet sich die Farbscheibe anfänglich in der Position E. Dann werden bei einer vollständigen Umdrehung der Farbscheibe (Abb. 4.9 E, F, G, H, E) die Farben Gelb und Rot durchgelassen, während Blau und Grün ausgeblendet werden.

Fall	auf Schirm sichtbar	auf Scheibe sichtbar
1	Grün/Blau=Türkis	Gelb/Rot=Orange
2	Gelb/Rot=Orange	Grün/Blau=Türkis

Tabelle 4.1.: Mögliche sichtbare Farben auf dem Schirm und auf der rotierenden Kunststoffscheibe im Laufe einer vollständigen Umdrehung.

Da dieser Vorgang sehr schnell abläuft, werden die Farben entsprechend Tabelle 4.10 auf dem Schirm und auf der Kunststoffscheibe „gemischt“. Wir können dies anhand der Addition der Einzelfarben aus Abbildung 4.6 zeigen. Durch Addition der beiden Farbwerte entstehen tatsächlich ein Orange- und ein Türkiston auf dem Schirm bzw. der Kunststoffscheibe, je nachdem welcher Fall betrachtet wird. Mit Hilfe dieser Beschreibung wird erklärbar, warum die Scheibe und der Schirm mit zwei komplementären Farben beleuchtet werden und welche Farben dies sind. Dabei wird vorausgesetzt, dass die beiden Scheiben mit der gleichen Drehzahl

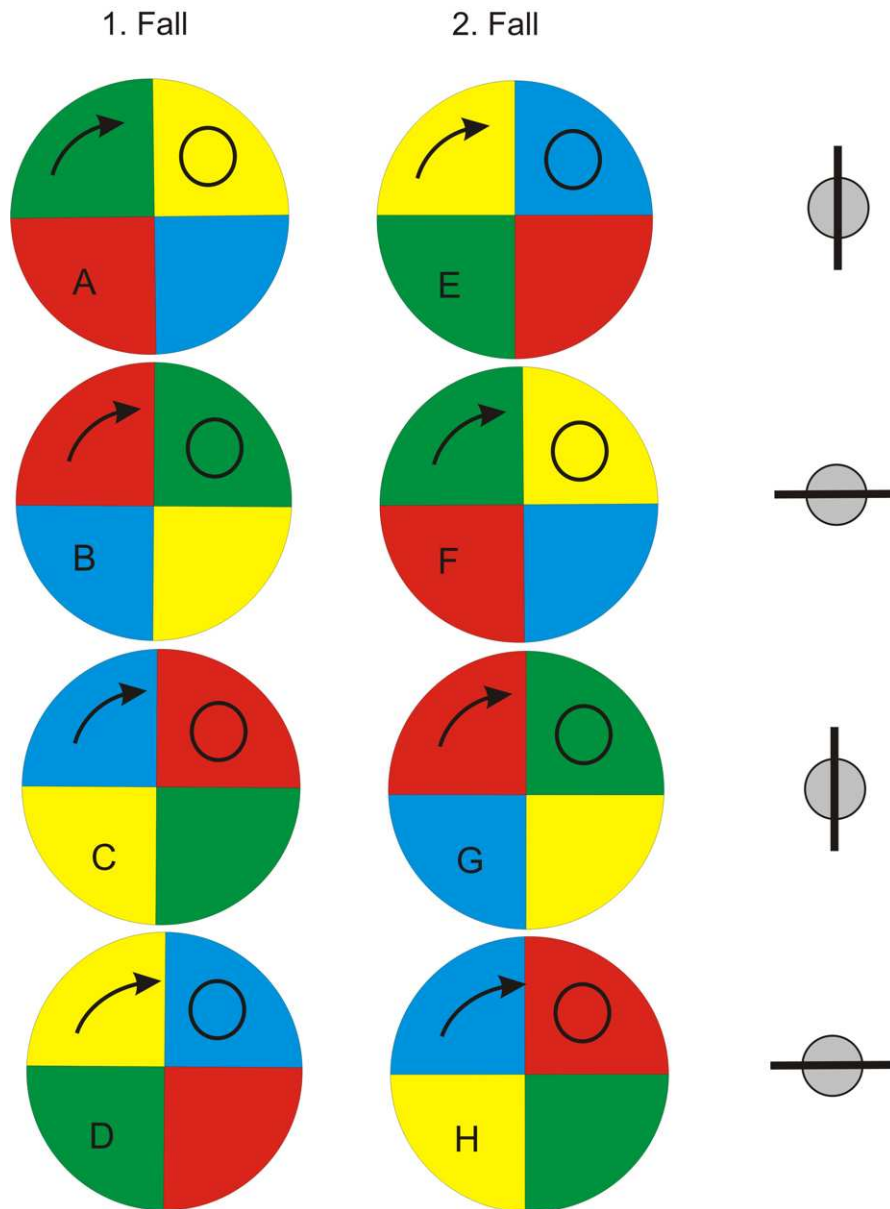


Abbildung 4.9.: Zum Verständnis des Farbeindrucks bei gleicher Frequenz von Farb- und Kunststoffscheibe. Die Abbildungen A bis D sowie E bis H stellen verschiedene mögliche Phasenlagen der Farbscheibe dar. Rechts daneben wird die Stellung der Kunststoffscheibe in der Draufsicht dargestellt. Je nach Stellung der Kunststoffscheibe wird eine bestimmte Farbe in Richtung Schirm durchgelassen oder ausgeblendet.

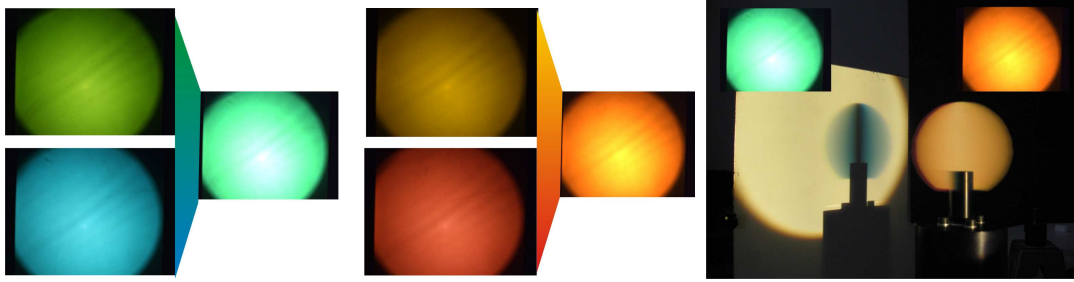


Abbildung 4.10.: **Links:** Numerische Addition der Fotos der Einzelfarben aus Abbildung 4.6. Dabei entsteht ein Blau- und ein Orangeton.

Rechts: Vergleich der numerischen Addition der Fotos aus Abbildung 4.10 mit dem Experiment.

rotieren, und es werden nur die Fälle mit senkrechter Beleuchtung berücksichtigt. Bei Betrachtung aus Sicht der Lampe steht die Scheibe also niemals schief zum Licht. Dadurch sind zu jeder Zeit alle Punkte der Scheibe gleichberechtigt, und alle Punkte auf der Scheibe haben dieselbe Farbe.

4.2.3. Farbentstehung mit einem Beamer als Lichtquelle

Bei Diskussionen mit Kollegen wurde ich darauf aufmerksam, dass Video-Beamer, die heutzutage vielfach zur Demonstration von Präsentationen oder Filmvorführungen genutzt werden, auch mit der Technik der Farbaddition arbeiten. Es lag daher für mich nahe, die Wirkung eines solchen Beamers im Zusammenhang mit dem Phänomen der rotierenden Farbscheibe zu untersuchen. Daher erschien es mir notwendig, etwas mehr über die Funktionsweise eines Video-Beamers zu erfahren. Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Funktionsprinzipien, die im Folgenden kurz beschrieben werden sollen.

4.2.3.1. DLP- und LCD-Beamer Technik

Obwohl sich die DLP (Digital Light Processing) Technik in vielen Punkten von der LCD (Liquid Crystal Display) Technik unterscheidet, gibt es dennoch Gemeinsamkeiten. Beide Techniken beruhen auf dem Prinzip der Farbaddition, d.h. das Bild besteht aus farbigen Bildpunkten, die im Auge des Beobachters zu einem farbigen Gesamtbild zusammengefügt werden. Die Besonderheit liegt jedoch in der Art der Farbaddition. Bei der DLP-Technik werden die Bildpunkte in schneller Abfolge nacheinander mit den Grundfarben Rot, Grün und Blau ausgeleuchtet. Die Trägheit des Auges sorgt dann für den Eindruck einer Mischfarbe. Im Gegensatz dazu wird bei der LCD-Technik ein Bildpunkt auf dem Schirm gleichzeitig mit den drei Grundfarben ausgeleuchtet. Die Farben werden demnach tatsächlich auf dem Schirm „gemischt“. Daher entstand folgende Hypothese:

Da nur ein DLP-Beamer mit einem ähnlichen Funktionsprinzip arbeitet, wie die rotierende Farbscheibe, sollten nur mit einem solchen Beamer bei entsprechenden Drehzahlen Farbaufspaltungen auf Scheibe und Schirm beobachtbar sein.

Diese Hypothese ließ sich leicht experimentell prüfen, da wir mehrere Video-Beamer im Hause hatten, denen die verschiedenen Funktionsprinzipien zu Grunde lagen. Es zeigten sich tatsächlich keine Farbaufspaltungen bei der Verwendung eines LCD-Beamers, und zwar unabhängig von der Drehzahl der rotierenden Scheibe.

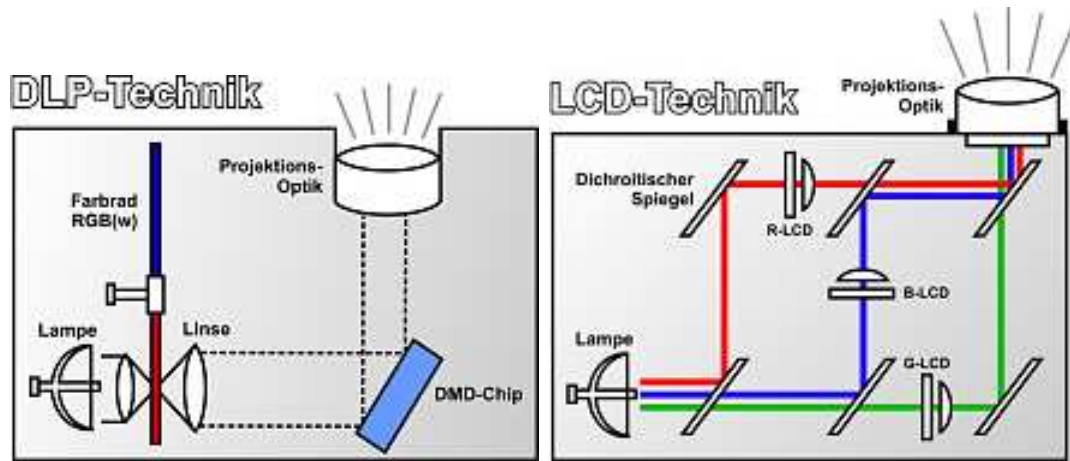


Abbildung 4.11.: Prinzip der DLP- und LCD-Beamer Technik. Während bei einem DLP-Beamer ein Bildpunkt nacheinander mit den Grundfarben beleuchtet wird, findet bei der LCD-Technik eine Überlagerung der Grundfarben auf dem Schirm statt. (Abbildung aus www.chip.de 05/08)

Tatsächlich hat die DLP-Technik viel mit dem Phänomen „rotierende Farbscheibe“ gemein, denn auch hier wird mit einer RGB-Farbscheibe das weiße Licht einer Lichtquelle in die Grundfarben Rot, Grün und Blau zerlegt [17]. Eine Vielzahl kleiner beweglicher Spiegel⁴ auf einem Halbleiterchip, an denen das Licht reflektiert wird, beleuchten die Bildpixel auf der Leinwand. Das entstehende Bild auf dem Schirm wird daher nacheinander mit den drei Grundfarben ausgeleuchtet. Der wesentliche Vorteil dieser Technik liegt in der hohen möglichen Lichtintensität des Bildes.

Im Gegensatz dazu wird das Licht der Lampe bei der LCD-Technik zunächst mit Hilfe von drei dichroitischen Spiegeln⁵ in die Grundfarben zerlegt wird. Das farbige Licht durchläuft dann durch drei LCD-Panels, bei denen durch Schwärzung bestimmte Pixel ausgeblendet werden können. Es entstehen sozusagen drei Bilder (Rot, Grün, Blau), die mit Hilfe der Projektionsoptik wieder zu einem farbigen Gesamtbild „addiert“ werden. Die Vorteile der LCD-Technik liegen in der besseren Farbdarstellung, und es sind höhere Auflösungen auch im niedrigeren Preisniveau möglich.

Im Experiment habe ich das System Lampe und Farbscheibe durch einen DLP-Beamer ersetzt. Als projiziertes Bild wurde eine vollständig weiße Fläche gewählt. Zusammen mit der rotierenden Scheibe lassen sich die Farbaufspaltungen in die Grundfarben gut erkennen (Abb. 4.12). Deutlich sichtbar ist die zusätzliche Beimischung eines weißen Anteils. Dieser dient dazu, das Bild insgesamt aufzuhellen. Da die Farbwiederholfrequenz des Beamers deutlich kleiner ist als

⁴Die Anzahl der Spiegel beträgt $1280 \cdot 720 = 921600$ Stück.

⁵Dichroitische Spiegel besitzen an ihrer Oberfläche eine Vielzahl dünner, dielektrischer Schichten. Durch optische Interferenz wird nur eine bestimmte Wellenlänge reflektiert und der Rest transmittiert. Dadurch fungieren diese Spiegel als Reflektions-FarbfILTER.

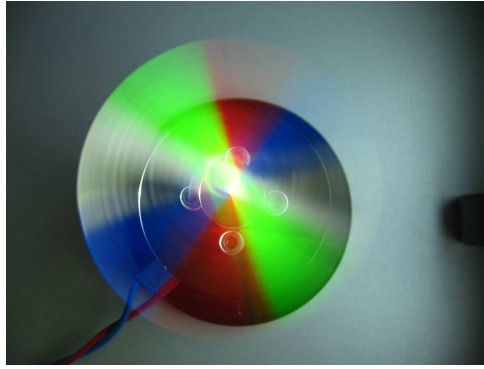


Abbildung 4.12.: Ausleuchtung der rotierenden Scheibe mit einem DLP-Beamer (Ansicht von oben). Deutlich zu erkennen ist die Farbaufspaltung in die drei Grundfarben und Weiss. Die Scheibe wird mit „weißem Licht“ ausgeleuchtet.

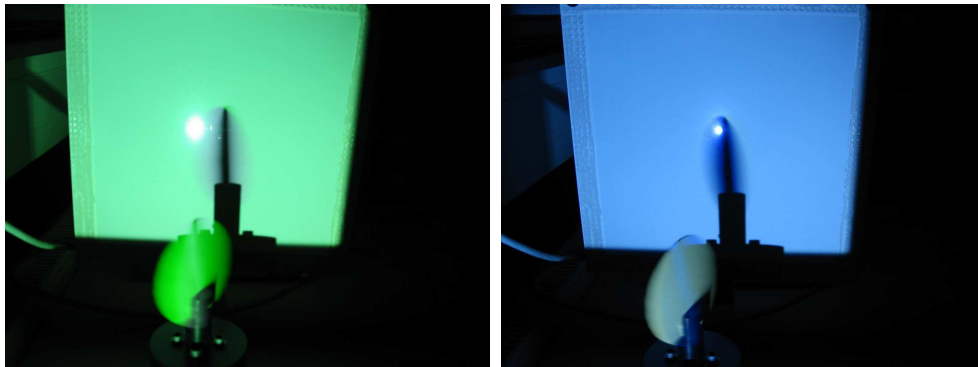


Abbildung 4.13.: Nachweis der Farbaufspaltung weißen Lichts in einem DLP-Beamer durch Fotos mit einer Digitalkamera. Die Belichtungszeit und die Beleuchtungszeit einer Grundfarbe liegen in gleicher Größenordnung.

bei dem Aufbau mit der rotierenden Farbscheibe⁶, lassen sich die schnell nacheinander abfolgenden Farbbilder bereits mit einer Digitalkamera nachweisen. Die Belichtungszeit liegt in der Größenordnung der Projektionszeit einer Farbe. Abbildung 4.13 zeigt zwei Fotos des Aufbaus bei Beleuchtung mit “weißem Licht” eines DLP-Beamers. Im linken Bild wird die Anordnung gerade mit grünem Licht ausgeleuchtet. Einen Augenblick später, im rechten Bild, wird sie blau ausgeleuchtet.

4.3. Zweite Phase eigener Untersuchungen

Bei Diskussionen mit Fachkollegen wurden mir erste Lücken der bisherigen Modellvorstellung zur Farhentstehung deutlich. Ein wesentlicher Punkt ist, dass bisher das Zustandekommen verschiedener Farben bei halber Drehzahl noch nicht verstanden ist. Daher konzentrierte ich mich in einer zweiten experimentellen Untersuchungsphase auf die Klärung folgender Fragen:

⁶Die Farbwiederholffrequenz beträgt bei der Farbscheibe etwa 100 Hz und bei unserem DLP-Beamer etwa die Hälfte.

1. Die Scheibe hat im Experiment nicht in jedem Punkt dieselbe Färbung (vgl. Abbildung 4.7 links), sondern sie ist in der Mitte weiß und zum Rand hin Orange. Dieser Übergang ist kontinuierlich. Wie ist dies zu erklären?
2. Wie ändert sich die Färbung, wenn die beiden Scheiben nicht identische Drehzahlen haben?

4.3.1. Zweiter quantitativer Ansatz

Es ist offensichtlich notwendig die bestehenden Modellvorstellungen über die Farhentstehung bei der rotierenden Scheibe zu verallgemeinern und zu vertiefen, um Antworten auf die obigen Fragen zu gewinnen. Dies soll in diesem Abschnitt geschehen. Vorher müssen jedoch einige Annahmen gemacht und Definitionen festgelegt werden.

4.3.1.1. Annahmen und Definitionen

Vor einem Schirm rotiert eine Scheibe mit der Frequenz ω . Sie wird von rechts durch eine Lichtquelle mit parallelem Licht beleuchtet, das senkrecht auf den Schirm trifft (Abb. 4.14). Vor der Lichtquelle rotiert eine Farbfilterscheibe mit der Frequenz Ω . Das Licht durchläuft dadurch periodisch vier Farben in der Farbreihenfolge

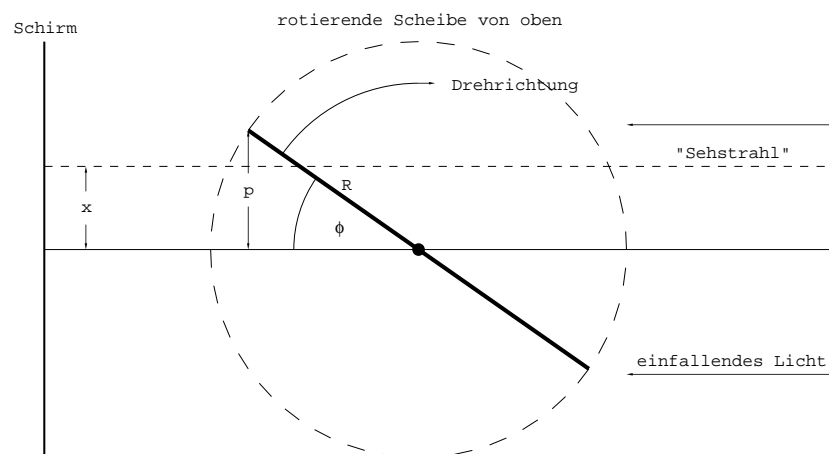


Abbildung 4.14.: Versuchsanordnung aus der Sicht von oben. Der Drehwinkel der Scheibe ändert sich gemäß $\phi = \omega t$, x ist der Abstand des „Sehstrahls“ von der Rotationsachse, und p bezeichnet den Abstand des Randpunktes von der Achse in der Projektion auf dem Schirm.

Rot – Blau – Gelb – Grün

Zur präzisen Beschreibung der Vorgänge werden die folgenden Vereinbarungen getroffen:

1. Die Scheibe dreht sich von oben betrachtet *im Uhrzeigersinn*. Ihr *Drehwinkel* ϕ wird gegen die Richtung des einfallenden Lichtes gemessen – und zwar so, dass der Drehwinkel mit der Zeit größer wird. Die Zeit beginnt bei einem Nulldurchgang der Scheibe. Mit dieser Vereinbarung ändert sich der Drehwinkel der Scheibe gemäß

$$\phi(t) = \omega t \quad (4.3)$$

2. Zur Zeit t_0 wechselt die Beleuchtungsfarbe von Grün nach Rot. Wenn der Farbwechsel Grün/Rot zu einer Zeit $t_0 \neq 0$ stattfindet, dann tritt eine *Phasenverschiebung* $\Delta\phi$ zwischen der Rotation der Scheibe und dem Farbwechsel auf. Dabei bedeutet $t_0 > 0$, dass der Farbwechsel Grün/Rot erst *nach* dem Nulldurchgang der Scheibe stattfindet. Der Drehwinkel der Scheibe beträgt dann bereits

$$\phi = \Delta\phi = \omega t_0 \quad (4.4)$$

4.3.1.2. Das „Sehstrahlenmodell“

Blickt man aus Richtung Lampe in Richtung eines bestimmten Punktes (x, y) auf dem Schirm, dann *trifft der Blick* zeitweise auf die rotierende Scheibe. Man könnte auch sagen: *Der „Sehstrahl“ wird von der Scheibe geschnitten*. Ich werde beide Ausdrucksweisen gleichberechtigt verwenden. Je nach Farbe des Lichtes erscheint die Scheibe *in diesem Moment* und *an dieser Stelle* in einer bestimmten Farbe. Der Anblick der rotierenden Scheibe ergibt sich, wegen der Trägheit des Auges, durch zeitliche Mittelung über die Farben der Scheibenpunkte, auf die der Blick trifft: Je länger der Blick auf die Scheibe trifft, desto heller erscheint das Rotationsbild dort, je länger die Scheibe dabei blau beleuchtet wird, desto bläulicher erscheint der Anblick der rotierenden Scheibe an dieser Stelle. Der gesamte Anblick der rotierenden Scheibe ergibt sich durch alle Sehstrahlen, die von ihr geschnitten werden.

Auf den Schirm fällt das Licht, das nicht auf die Scheibe trifft. An jeder Stelle (x, y) ist der Schirm so hell und so gefärbt, dass sich zusammen mit dem Scheibenanblick die mittlere Farbe des Lampenlichts, im Idealfall also Weiß, ergibt.

Die Färbungen des Scheibenanblicks und des Schattens auf dem Schirm sind komplementär zueinander.

4.3.1.3. Folgerungen aus dieser Modellvorstellung

Zunächst werde der Fall betrachtet, dass beide Scheiben mit derselben Frequenz und in Phase rotieren: $\omega = \Omega$ und $t_0 = 0$. Scheibe und Schirm werden aus Richtung der Lampe betrachtet. Um die folgenden Darstellungen verständlicher zu machen, wird kurzzeitig zusätzlich angenommen, dass die Scheibe, anders als im Experiment, nur *einseitig*, wie ein Wimpel, an der Rotationsachse befestigt ist. Die Höhe des Rechtecks sei doppelt so groß wie die Breite R . Dann sind das Rotationsbild der Scheibe und ihr Schatten auf dem Schirm quadratisch.

Unter diesen Vereinfachungen lassen sich die Beobachtungen leicht erklären bzw. vorhersagen:

1. Während der ersten Viertelumdrehung wird die Scheibe rot beleuchtet, während der zweiten Viertelumdrehung blau usw. Sieht man sich die Scheibe von oben an, ergibt sich also der in Abbildung 4.15 dargestellte Anblick.

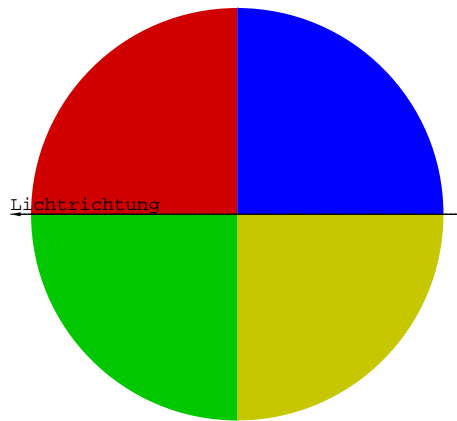


Abbildung 4.15.: Der Anblick auf die rotierende Scheibe von oben, der sich unter den vorstehend diskutierten Vereinfachungen ergibt.

2. Betrachtet man die Scheibe dagegen von vorn, dann erscheint sie rechts (im Bild oben) in der Mischfarbe Rot+Blau=Magenta, weil sie, wenn sie von Licht getroffen wird, gleich lange diesen beiden Farben ausgesetzt ist. Links erscheint die Scheibe in der Mischfarbe Grün+Gelb=Grüngelb. Je weiter sich der Blick von der Achse entfernt, desto kürzer trifft der Blick auf die Scheibe. Mit anderen Worten: Das Rotationsbild erscheint nach außen immer dunkler (Abb. 4.26).
3. Der Schatten ist entlang der Rotationsachse dunkel, weil das Licht dort während fast einer halben Umdrehung auf die Scheibe und nicht auf den Schirm trifft. Nach außen wird der Schatten immer heller, da dort das Licht immer seltener von der Scheibe „abgefangen“ wird. Für den Anblick der rotierenden Scheibe gelten komplementäre Aussagen (z.B. Abb. 4.7).

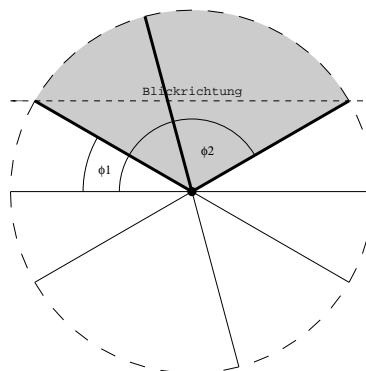


Abbildung 4.16.: Je mehr sich der Blick der Rotationsachse nähert, desto größer ist das Winkelintervall, während dessen der Blick auf die Scheibe trifft.

4.3.1.4. Rotations- und Projektionsdarstellungen

Die Zeit, während der die Scheibe eine Blickrichtung kreuzt („vom Sehstrahl getroffen wird“), entspricht einem Winkelintervall $\phi_2 - \phi_1$ (Abb. 4.16). Diese Darstellung macht deutlich, dass das Winkelintervall (und damit das Zeitintervall), während dessen der Blick auf die Scheibe trifft, umso kleiner wird, je weiter sich der Blick von der Rotationsachse entfernt. Nahe der Achse wird er fast während einer halben Umdrehung von der Scheibe getroffen. Wenn man die Darstellungen in den Abbildungen 4.16 und 4.15 kombiniert, dann kann man die Färbung der Scheibenansicht an einer bestimmten Stelle erkennen: Der Blick trifft ebenso lange auf Rot wie auf Blau, weil zu beiden Farben gleich große Zeitintervalle gehören.

Diese *Rotationsdarstellungen* sind jedoch weniger anschaulich, wenn die Vereinfachungen schrittweise aufgehoben werden. Dann ist eine Darstellung durch ein Diagramm geeigneter, in der die Drehung der Scheibe, genauer: die Projektion eines Punktes auf ihrem Rande, als Funktion der Zeit dargestellt wird. Kennzeichnet man darin die jeweilige Beleuchtungsfarbe und stellt den Abstand der Blickrichtung von der Achse durch eine horizontale Linie dar, dann erkennt man auf einen Blick, wie lange und zu welchen Zeiten der Blick auf die Scheibe trifft: Der Abstand des Sehstrahls von der Rotationsachse ist dann kleiner als der der Projektion. Das Diagramm zeigt auch, welche Farbe die Scheibe zu diesen Zeiten hat.

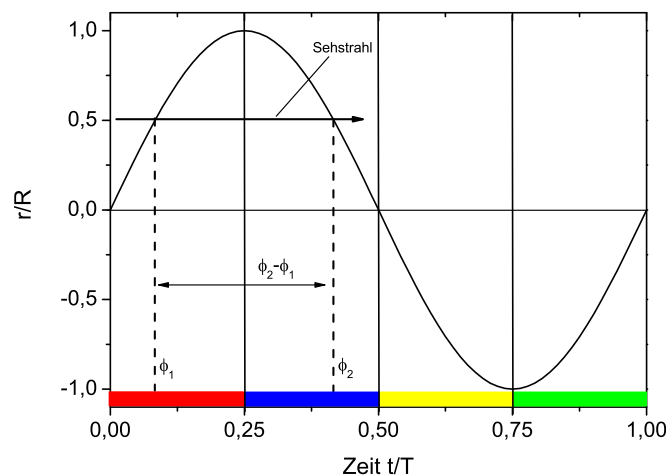


Abbildung 4.17.: Ein im Abstand $x = 0.5R$ von der Achse verlaufender Sehstrahl „schneidet“ die rotierende Scheibe im Winkelintervall $\phi_2 - \phi_1$. Darstellung des Sachverhaltes aus Abbildung 4.16 in der so genannten *Projektionsdarstellung*.

Man kann sich auf diese Weise vorstellen, wie die rotierende Scheibe und wie der Schirm an dieser Stelle aussehen werden. Bei einem Abstand $x = 0.5R$ des Sehstrahls von der Achse wird der Blick auf den Schirm zwischen den Drehwinkeln $\phi_1 = \arcsin 0.5 = 30^\circ$ und $\phi_2 = 150^\circ$, d.h. in der Zeit zwischen $t_1 = \frac{T}{12}$ und $t_2 = \frac{5T}{12}$ durch die Scheibe versperrt.

4.3.1.5. Der Übergang vom „Wimpel“ zu einem „symmetrischen Quadrat“

Ergänzen wir nun, entsprechend dem Experiment, die einseitige Scheibe zu einem vollständigen Quadrat, das symmetrisch an der Rotationsachse befestigt ist. Dieses Quadrat kann man sich aus zwei Halbquadraten zusammengesetzt denken, die um 180° gegeneinander phasenversetzt rotieren. In der Ansicht von oben wird in diesem Falle eine Überlagerung der beiden entsprechenden „Segmentscheiben“ zu beobachten sein.

In der Projektionsdarstellung (Abb. 4.18) taucht durch die zweite Hälfte eine zusätzliche Projektionsfunktion auf (gestrichelt). Die neu entstehende Farbmischung äußert sich darin, dass ein Sehstrahl während einer Periode zweimal von der Scheibe geschnitten wird. Die Darstellung macht deutlich, dass bei beliebigen Abständen von der Achse, sich alle vier Farben zu gleichen Teilen überlagern:

Die Scheibe und der Schatten werden in diesem Fall grau aussehen.

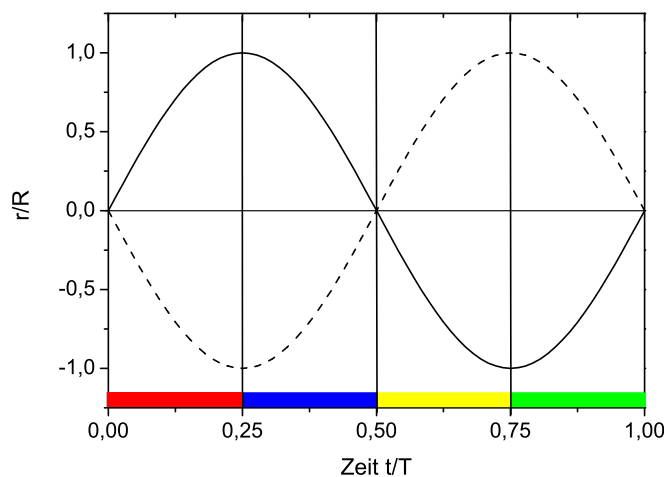


Abbildung 4.18.: Beim Übergang vom Wimpel zu einem symmetrischen Quadrat wird die zweite Halbwelle in der Rotationsdarstellung relevant. Durch Überlagerung der entsprechenden „Segmentscheiben“ erscheint im hier dargestellten Fall für einen Beobachter die Scheibe weiß.

4.3.1.6. Phasenverschiebung

Was ändert sich, wenn zwischen den beiden rotierenden Scheiben eine Phasenverschiebung herrscht? In diesem Fall verschieben sich die Farbintervalle in der Projektionsdarstellung um t_0 . Man macht sich sofort klar, dass dann die Schnittbereiche des Sehstrahls unter Umständen mit einer anderen Farbe ausgeleuchtet werden.

In der Projektionsdarstellung verschieben sich bei einer Phasenverschiebung die Farbintervalle .

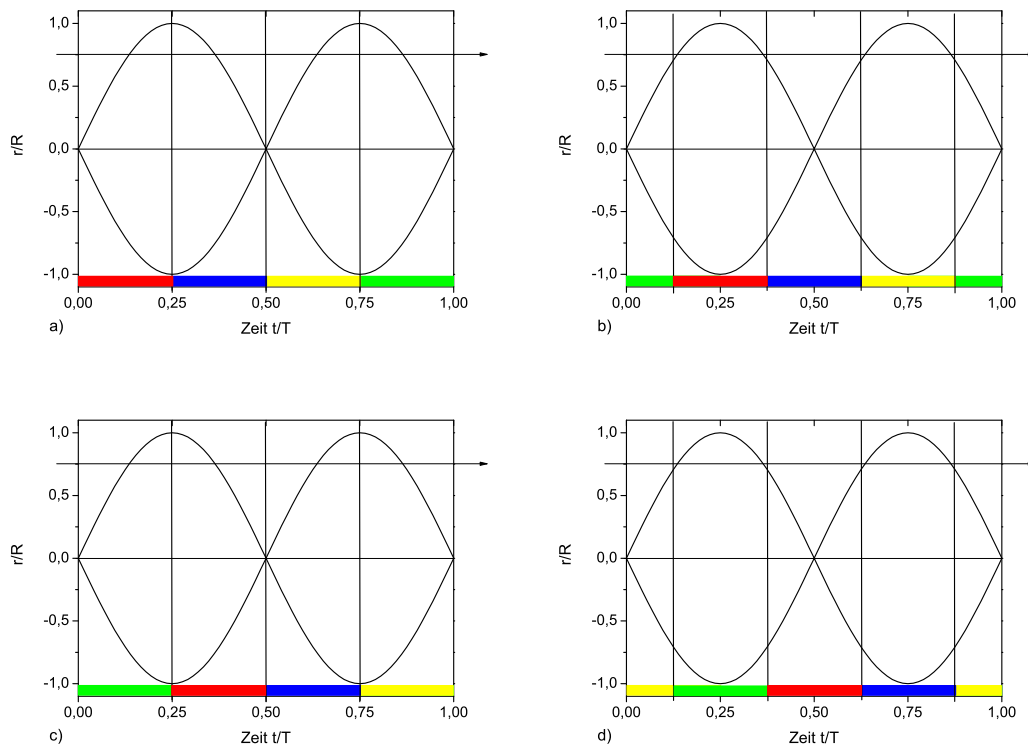


Abbildung 4.19.: a) Die Phasenverschiebung zwischen Farbscheibe und rotierender Scheibe ist null. Die Scheibe erscheint für einen Beobachter in jedem Punkt grau.
b) Die Phasenverschiebung zwischen Farbscheibe und rotierender Scheibe ist 45° . Die Scheibe erscheint für einen Beobachter außen Orange und Innen Weiss.
c) Die Phasenverschiebung zwischen Farbscheibe und rotierender Scheibe ist 90° . Auch hier erscheint die Scheibe für einen Beobachter in jedem Punkt unbunt.
d) Die Phasenverschiebung zwischen Farbscheibe und rotierender Scheibe ist 135° . Die Scheibe erscheint für einen Beobachter außen Türkis und innen Weiss.

Wir betrachten Abbildung 4.19 a. Hier besteht keine Phasenverschiebung zwischen den beiden rotierenden Scheiben. In Abbildung 4.19 b wurden die Farbintervalle um 45° phasenverschoben. Im äußeren Bereich wird die Scheibe nun rot/gelb ausgeleuchtet. Bei einer kontinuierlichen Phasenänderung erscheint die Scheibe zunächst grau (Abb. 4.19 a), dann rot/gelb (Abb. 4.19 b), dann wieder grau (Abb. 4.19 c) und schließlich grün/blau (Abb. 4.19 d).

4.3.2. Blick von der Seite

Da offensichtlich die Phasenlage entscheidend für den Farbeindruck ist, den ein Beobachter von der rotierenden Scheibe erhält, wurde mir an dieser Stelle erst bewusst, dass auch eine Änderung der Blickrichtung Auswirkungen auf den beobachteten Farbeindruck haben muss. Es kommt nämlich in diesem Zusammenhang bei einem bestimmten Zeitpunkt auf die Stellung der Farbscheibe (die Lage der Farbintervalle) und die Position der rotierenden Scheibe (der Wert von ϕ) an. Wir gehen von der Situation in Abbildung 4.19 b aus. In diesem Fall wird die rotierende Scheibe im äußeren Bereich rot/gelb ausgeleuchtet. Eine Phasenverschiebung von 90°

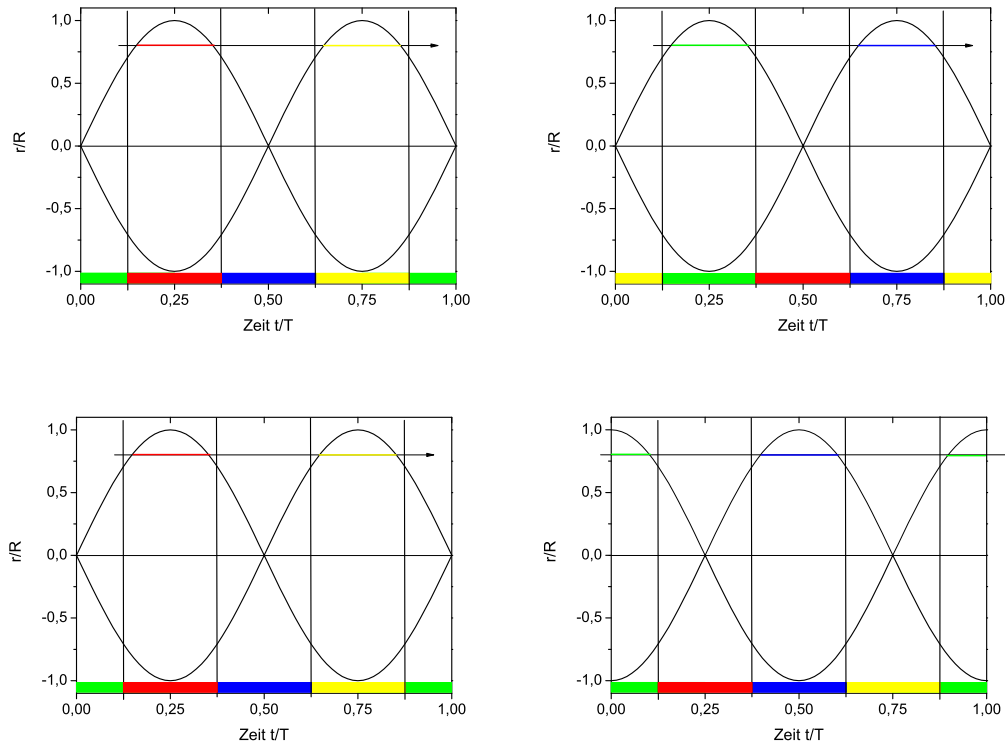


Abbildung 4.20.: **Die oberen beiden Bilder:** Verschiebung der *Winkelintervalle* um 90° nach rechts. Der Farbeindruck der rotierenden Scheibe ändert sich von rot/gelb auf grün/blau.
Die unteren beiden Bilder: Verschiebung der *Winkelfunktion* um 90° . Der Farbeindruck der rotierenden Scheibe ändert sich *ebenfalls* von rot/gelb auf grün/blau.

zwischen den beiden Scheiben erhält man in der Projektionsdarstellung dadurch, dass die Farbinsintervalle um 90° nach rechts verschoben werden. In Abbildung 4.20 wird dieser Sachverhalt durch die oberen beiden Bilder, zwischen denen eine Phasenverschiebung von 90° besteht, deutlich. Dabei wird die Position des Beobachters jedoch nicht verändert. Bei einer Veränderung des Blickwinkels ändert sich der Winkel ϕ und deshalb geht dies in der Projektionsdarstellung mit einer Verschiebung der Winkelfunktion einher. Dies wird in den unteren beiden Bildern in Abbildung 4.20 gezeigt.

1. Eine Veränderung des Blickwinkels äußert sich in der Projektionsdarstellung in einer zeitlichen Verschiebung der Projektionskurve um $t = \alpha/\omega$.
2. Eine Veränderung des Blickwinkels um 90° liefert aus der Sicht eines Beobachters die gleichen Resultate, wie eine Verschiebung der Winkelintervalle um 90° .

Die Scheibe wird dann grün/blau ausgeleuchtet. Die Scheibe hat beim Blick von der Seite im äußeren Bereich die gleiche Farbe, wie ihre Schattenprojektion auf dem Schirm. Verändert man also seine Beobachtungsrichtung um 90° , so ändert sich die Farbe der Scheibe in die entspre-

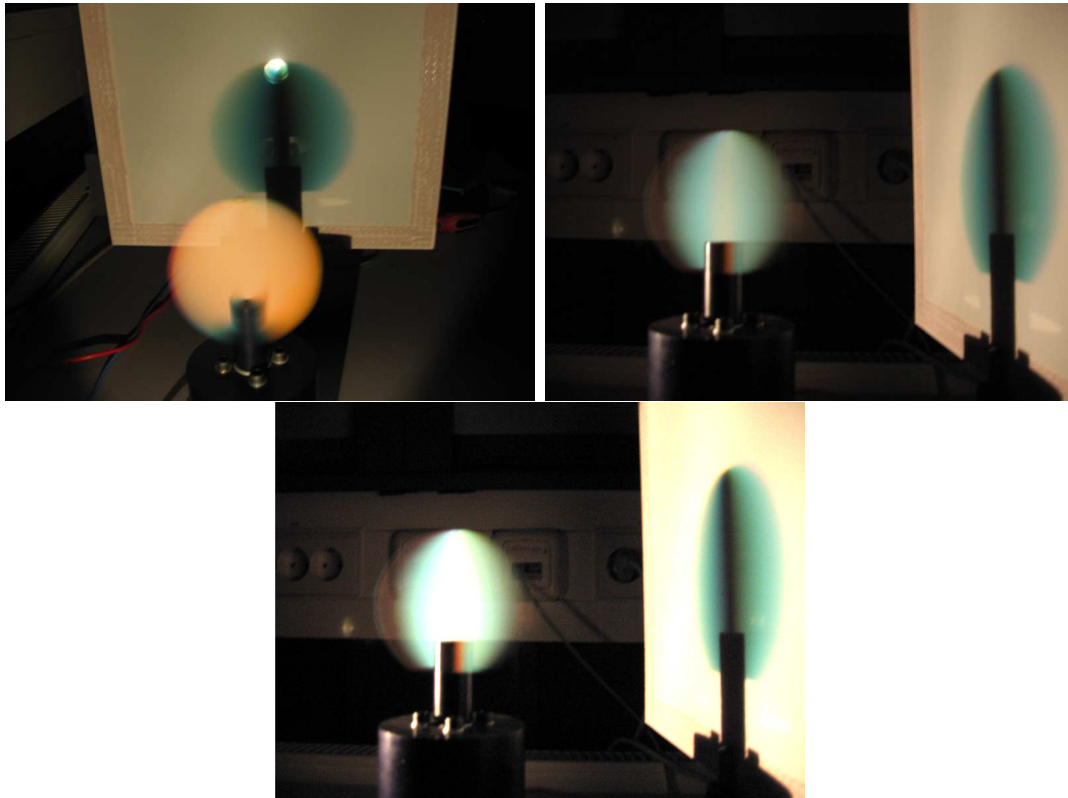


Abbildung 4.21.: Je nach Blickrichtung auf die Scheibe hat man einen anderen Farbeindruck. Von der Seite aus gesehen hat die Scheibe die gleiche Färbung wie das projizierte Schattenbild auf dem Schirm. Im unteren Bild, welches aufgehellte, erkennt man den vollständigen Umriss der Scheibe beim Blick von der Seite. Bei normalen Lichtverhältnissen erscheint die runde Scheibe durch die Abschattung elliptisch.

chende Komplementärfarbe⁷. Dies war ein besonderer Punkt im Laufe meiner experimentellen Tätigkeit an diesem Phänomen. Die Abhängigkeit der sichtbaren Farben auf Scheibe und Schirm von der Position des Beobachters war mir bis zu diesem Moment nicht aufgefallen, obwohl sie sehr auffällig ist. Erst als ich durch genaues Durchdenken der Theorie, nämlich bei Betrachtung der Projektionsdarstellungen bei unterschiedlichen Phasenlagen (Abb. 4.19 c und d) zu der Erkenntnis kam, dass eine solche Abhängigkeit existieren muss, nahm ich auch im Experiment diese Abhängigkeit wahr. Die Theorie kann einen verschärften Blick auf das Experiment eröffnen und offenbart so Aspekte, die ohne sie vermutlich nicht wahrgenommen worden wären. Ein weiterer wichtiger Punkt, der durch einen verschärften Blick auf das Experiment in den Fokus der Untersuchungen rückte, war die Abschattung.

4.3.2.1. Das Phänomen der Abschattung

Die Abschattung sorgt dafür, dass die vom Beobachter wahrgenommene, rotierende Scheibe beim Blick von der Seite insgesamt dunkler scheint, als beim Blick aus Richtung der Lampe. Dies wird in Abbildung 4.21 oben rechts deutlich. Die Scheibe scheint hier im Vergleich zum Blick aus

⁷Es sei denn, die Scheibe wird gerade grau ausgeleuchtet. In diesem Fall hat man auch bei einer Phasenverschiebung von 90° einen grauen Farbeindruck.

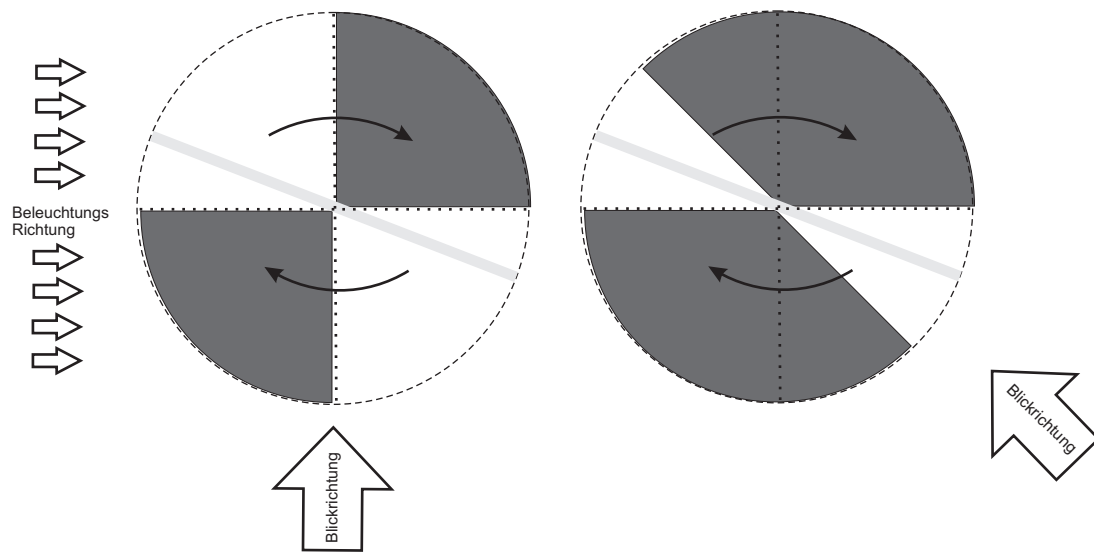


Abbildung 4.22.: Das Phänomen der Abschattung. Im Laufe einer Umdrehung der Scheibe wird diese teilweise „von sich selbst verdeckt“. Das bedeutet: Beim Durchlaufen bestimmter Winkelintervalle ist die Scheibe für einen Beobachter nicht sichtbar. Je nach Blickrichtung fallen die „abgeschatteten“ Bereiche der Scheibe größer oder kleiner aus. Im rechten Bild (Beobachtungswinkel $\alpha > 90^\circ$) ist der Anblick elliptisch.

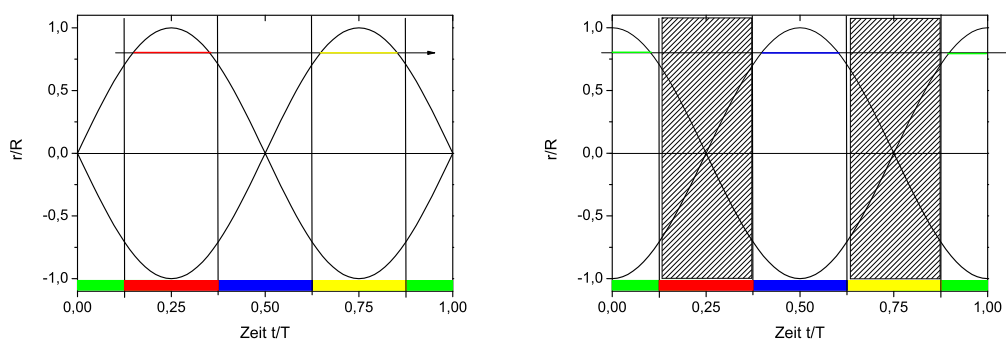


Abbildung 4.23.: Änderung der Blickrichtung um 90° und Berücksichtigung der Abschattung: So lange die Scheibe die schraffierten Zeitintervalle durchläuft, wird sie nicht beleuchtet.

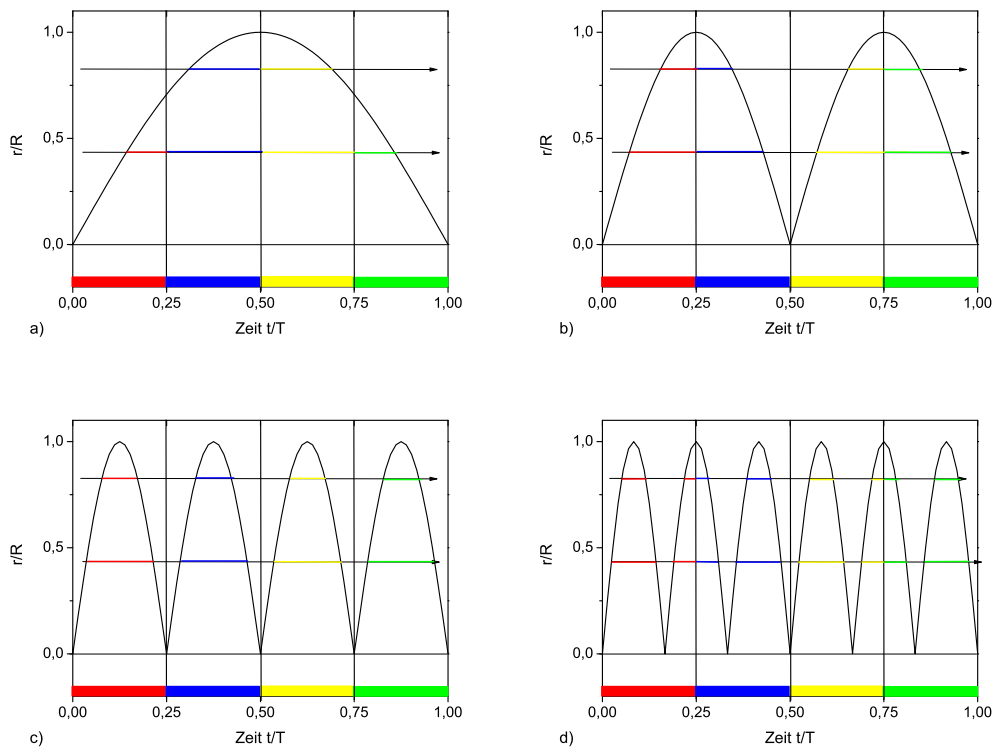


Abbildung 4.24.: Projektionsdarstellungen für verschiedene Rotationsfrequenzen:

a) Frequenz $f = \Omega/2$ b) Frequenz $f = \Omega$ c) Frequenz $f = 2\Omega$ d) Frequenz $f = 3\Omega$

Richtung der Lampe eine deutlich elliptische Gestalt zu haben. Die Ursache liegt darin, dass die Scheibe im Laufe einer vollständigen Umdrehung teilweise aus der Sicht des Beobachters nicht beleuchtet wird. Zur genaueren Erklärung betrachten wir Abbildung 4.22 links. Durchläuft die Scheibe die Winkelintervalle $90^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ und $270^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$, so wird sie aus der Sicht des Beobachters nicht beleuchtet, da sie sich selbst verdeckt. Insgesamt wird deshalb aus Sicht des Beobachters die Scheibe eine halbe Umdrehung lang nicht beleuchtet. Sie erscheint daher insgesamt dunkler. Dies äußert sich besonders deutlich an den Rändern der Scheibe, die in Abbildung 4.21 oben rechts praktisch nicht mehr zu erkennen sind. Die Scheibe scheint elliptisch zu sein. Mit Hilfe einer Bildverarbeitungssoftware lässt sich das Bild insgesamt aufhellen (Abb. 4.21 unten) und es wird wieder die vollständig runde Scheibe erkennbar. In Abbildung 4.22 rechts ist der Beobachtungswinkel α größer als 90° . Die Abschattung ist entsprechend größer als für $\alpha = 90^\circ$. Dadurch ist der Anblick der Scheibe tatsächlich elliptisch.

4.3.3. Beliebige Rotationsfrequenzen

Nun soll eine weitere einschränkende Bedingung aufgehoben werden: Die rotierende Scheibe kann nun mit beliebiger Geschwindigkeit rotieren. Diese Annahme hat natürlich Auswirkungen auf die Farberscheinungen, die man auf den beiden Scheiben beobachtet. Wir setzen voraus, dass die Phasenverschiebung zwischen den Scheiben null sei. In Abbildung 4.24 wird die Frequenz der rotierenden Scheibe von $\Omega/2$ auf 3Ω erhöht, wobei Ω die Frequenz der Farbscheibe vor

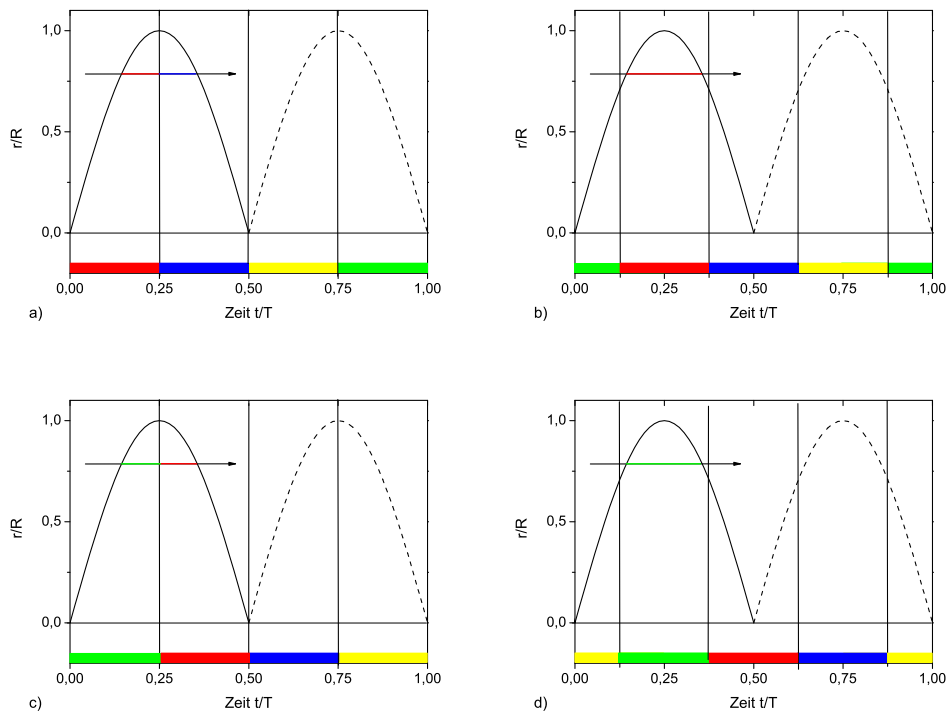


Abbildung 4.25.: Farbestellung bei einer auf einer Seite geschwärzten Scheibe:

- a) Die Phasenverschiebung zwischen Farbscheibe und rotierender Scheibe ist 0° . Die Scheibe erscheint für einen Beobachter innen und außen rot/blau.
- b) Die Phasenverschiebung zwischen Farbscheibe und rotierender Scheibe ist 45° . Die Scheibe erscheint für einen Beobachter außen rot und innen grün/rot/blau.
- c) Die Phasenverschiebung zwischen Farbscheibe und rotierender Scheibe ist 90° . Die Scheibe erscheint für einen Beobachter innen und außen grün/rot.
- d) Die Phasenverschiebung zwischen Farbscheibe und rotierender Scheibe ist 135° . Die Scheibe erscheint für einen Beobachter außen grün und innen gelb/grün/rot.

der Lampe ist. Anhand dieser Darstellungen kann auf den Farbeindruck geschlossen werden, den ein Beobachter empfindet. Rotiert die Scheibe mit der Frequenz $\Omega/2$, so erscheint diese gemäß Abbildung 4.24 a für den Beobachter außen blau/gelb und zur Mitte hin blau/gelb bis hin zu grau. Hat die Rotationsfrequenz den Wert Ω , so empfindet der Beobachter die Scheibe in jedem Punkt grau, da alle Farbanteile zu gleichen Teilen vorkommen⁸. Bei doppelter Frequenz werden wieder für alle Werte von x die Punkte der Scheibe mit allen Farben in gleichem Maße ausgeleuchtet. Die Scheibe wird insgesamt grau wahrgenommen (zum Rand hin Grau wegen abnehmender Intensität). Daraus kann geschlossen werden:

Je größer die Frequenz der rotierenden Scheibe ist, desto geringer wird der Einfluss unterschiedlicher Farbbeiträge und der Phasenlage. Mit zunehmender Frequenz wird die Scheibe immer weniger farbig wahrgenommen. Diese Aussage gilt für $\Delta\phi = 0$.

⁸Hier und in allen anderen Fällen wird die Scheibe aufgrund der kürzeren Beleuchtungszeit zum Rand hin dunkler wahrgenommen.

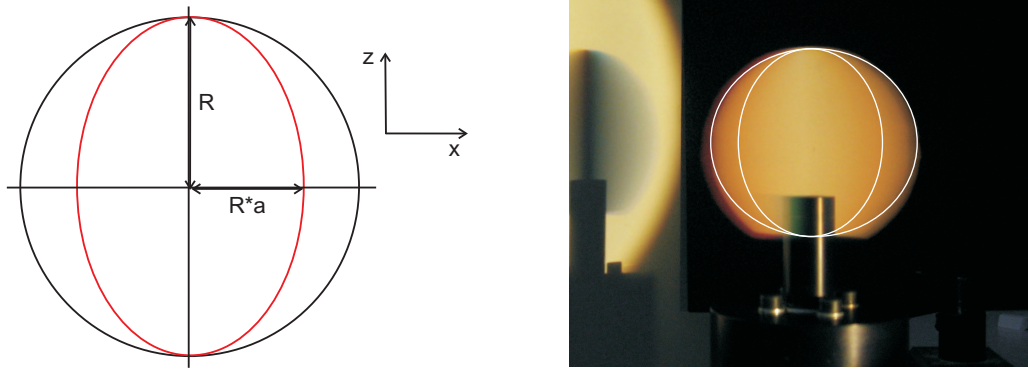


Abbildung 4.26.: **Links:** Darstellung der Ellipse nach Gleichung (4.7). Das Bild zeigt schematisch die rotierende Scheibe aus der Sicht des Beobachters.

Rechts: Foto der rot ausgeleuchteten Scheibe. Einer der nach außen immer dunkler werdenden elliptischen Bereiche ist weiß hervorgehoben.

4.3.4. Die Färbung des Randbereichs einer runden Kreisscheibe

Alle bisherigen Betrachtungen der Farbentstehung gingen davon aus, dass die rotierende Scheibe quadratisch sei. Diese Annahme stellt eine Vereinfachung dar, da in diesem Fall der effektive Radius von der Höhe unabhängig ist. Es spielt dann keine Rolle, in welcher Höhe z ein Sehstrahl die Scheibe trifft. Wir untersuchen nun einen Fall, indem diese Symmetrie nicht mehr gegeben ist. Die rotierende Scheibe sei nun kreisrund mit einem Radius R . Wir denken uns ein Koordinatensystem mit dem Ursprung im Mittelpunkt der Scheibe und einer z -Ordinate und einer x -Abszisse. Eine horizontale Linie in der Projektionsdarstellung („Sehstrahl“) repräsentiert einen Punkt auf der Scheibe, der vom Beobachter mit einer bestimmten Farbe wahrgenommen wird. Die Farbe hängt von den Beiträgen der einzelnen Farbanteile und somit vom Abstand des Sehstrahls von der Rotationsachse r ab, sowie vom effektiven Radius R_{eff} der Scheibe in der Höhe z . Alle Punkte für die gilt: $\frac{x}{R_{eff}} = const.$ werden vom Beobachter mit gleicher Färbung wahrgenommen.

$$\frac{x}{R_{eff}} = a = const. \quad (4.5)$$

Dabei ist a eine konstante Zahl. Da der effektive Radius gemäß $R_{eff} = \sqrt{R^2 - z^2}$ von der Höhe z abhängt, gilt:

$$\frac{x}{\sqrt{R^2 - z^2}} = a \quad (4.6)$$

Diese Beziehung lässt sich durch Quadrieren und anschließende Umformung in eine Ellipsengleichung umschreiben.

$$\frac{x^2}{(R \cdot a)^2} + \frac{z^2}{R^2} = 1 \quad (4.7)$$

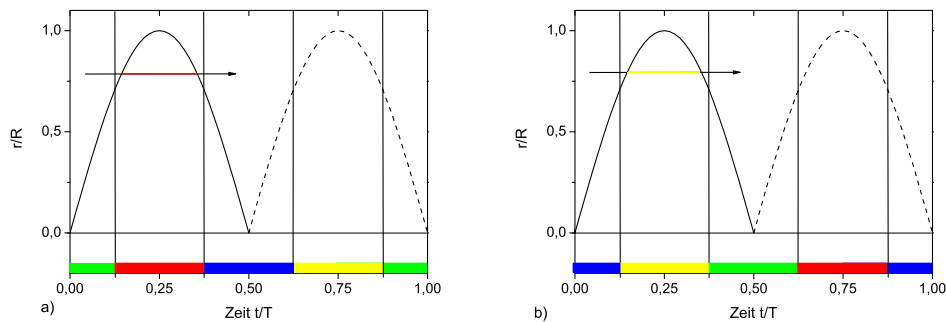


Abbildung 4.27.: Bei einer einseitig geschwärzten Kreisscheibe kann die Scheibe bei bestimmter Färbung des Schattens (hier grün/blau) zwei verschiedene Färbungen (hier rot oder gelb) annehmen.

Im Falle einer kreisrunden Scheibe liegen demnach alle Punkte mit gleicher Färbung auf Ellipsen um den Mittelpunkt der Scheibe. Diese Ellipsen werden zur Mitte hin schmaler und ihre Färbung geht von Einfarbig in Weiss über.

4.3.5. Eine auf der einen Seite geschwärzte Scheibe

Um die Modellbeschreibung zu prüfen, wird das Experiment nun ein wenig abgewandelt. Die rotierende, beidseitig weiße Kreisscheibe wird durch eine auf der Rückseite geschwärzte Kreisscheibe ersetzt. Dadurch wird immer dann, wenn die schwarze Fläche zur Lampe hin zeigt (aus deren Richtung auch der Beobachter zum Schirm hin blickt) kein Licht von der Scheibe zum Beobachter hin zurück reflektiert. Die Scheibe wird in diesem Fall für den Beobachter nicht sichtbar bzw. schwarz sein. Dies hat unmittelbar Auswirkungen auf den Farbeindruck, den ein Beobachter von der Scheibe haben muss.

In den Projektionsdarstellungen Abbildung 4.25 a-d wird der Farbeindruck im Falle einer rotierenden, auf der einen Seite geschwärzten Scheibe dargestellt. In Abbildung 4.25 zeigt die Scheibe für $0 \leq \Phi \leq 180^\circ$ mit ihrer weißen Seite zum Licht hin. Das Licht wird daher zum Beobachter zurückreflektiert und die Scheibe ist sichtbar. Im Falle $180 \leq \Phi \leq 360^\circ$ zeigt die Scheibe mit ihrer schwarzen Seite zum Licht hin. Da nun praktisch kein Licht reflektiert wird, erscheint die Scheibe für den Beobachter nicht sichtbar. Dies soll in Abbildung 4.25 dadurch verdeutlicht werden, dass die Linie gestrichelt dargestellt wird. Interessieren wir uns für den Farbeindruck auf der Scheibe, so darf deshalb die zweite Halbwelle nicht betrachtet werden. In den Abbildung 4.25a-d wird deshalb der „Sehstrahl“ nur durch die erste Halbwelle gezogen, da nur diese für den optischen Eindruck relevant ist. Es sei angemerkt, dass für den Farbeindruck auf dem Schirm die zweite Halbwelle weiterhin relevant bleibt, da beide Seiten der Scheibe einen Schatten auf den Schirm werfen.

Wir diskutieren eine weitere Besonderheit dieses Falles: Nehmen wir an, zwischen den Scheiben herrsche eine Phasenverschiebung von 45° (Abbildung 4.27 a). Die weiße Seite der Scheibe wird dann im äußeren Bereich mit rotem Licht ausgeleuchtet. Die Färbung des Schattens ist grün/blau. Er ist unabhängig davon, dass eine Seite der Scheibe geschwärzt wurde. Bei einer Phasenverschiebung von 180° ist die weiße Seite der Scheibe gelb gefärbt (Abb. 4.27 b), während der Schatten immer noch dieselbe Färbung grün/blau besitzt. Es sind demnach im Falle einer

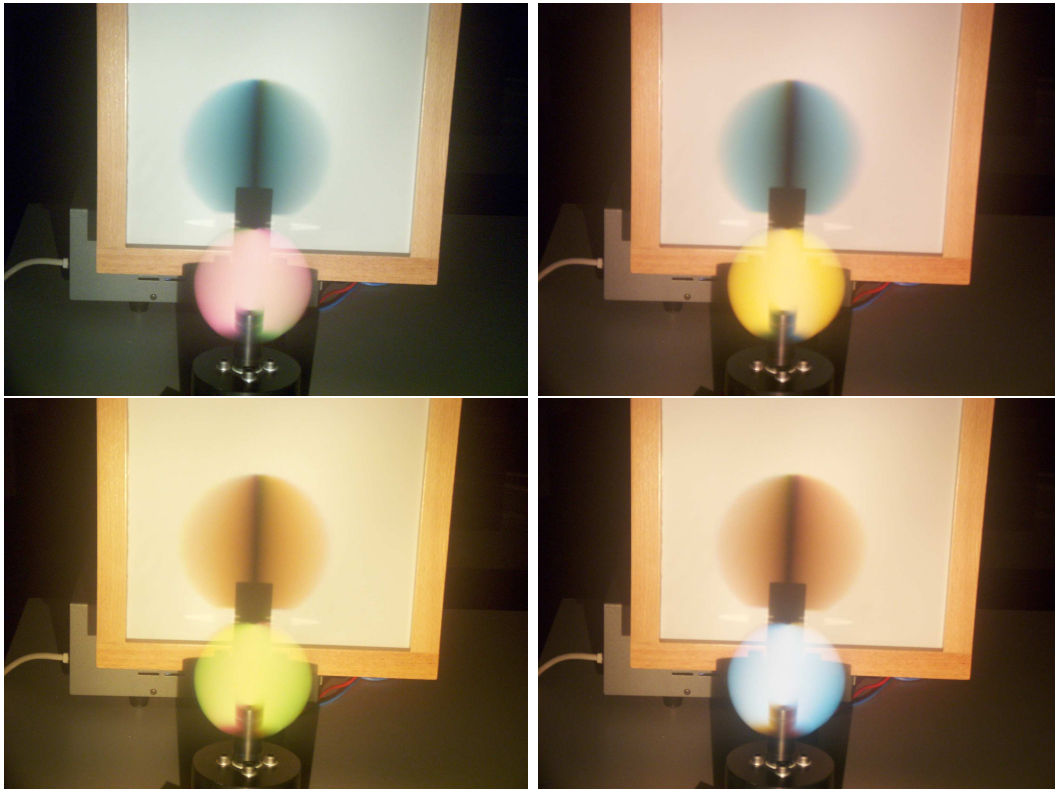


Abbildung 4.28.: Farbentstehung bei einer auf der einen Seite geschwärzten Scheibe. Es sind jeweils zwei verschiedene Farben der Scheibe bei einer bestimmten Farbe des Schattens auf dem Schirm möglich. Die beiden oberen und unteren Bilder unterscheiden sich dadurch, dass zwischen der Farbscheibe und der rotierenden Scheibe eine Phasenverschiebung von 90° herrscht.

farbigen Ausleuchtung des Schirms zwei Fälle der Färbung der rotierenden Scheibe möglich (Abb. 4.28).

4.4. Erfahrungen im Seminar

4.4.1. Vorführung des Phänomens

Als ich den Teilnehmern das Phänomen vorführte, war die Lampe⁹ mit der rotierenden Farbscheibe bereits eingeschaltet. Die Kunststoffscheibe rotierte noch nicht. Ich erläuterte kurz die wesentlichen Elemente des experimentellen Aufbaus und fragte dann die Teilnehmer: „Was glaubt ihr, wie sich der Schatten der Scheibe verändert, wenn sie rotiert?“ Im Allgemeinen erwarteten sie bei einer rotierenden Scheibe ein Schattenbild der folgenden Art: In der Mitte einen dunklen Bereich, der nach Außen hin immer heller wird, da die äußeren Teile der Scheibe die Lichtquelle pro Zeiteinheit weniger lang verdecken und diese Bereiche auf dem Schirm deshalb länger ausgeleuchtet werden¹⁰. Die drehbar gelagerte runde Scheibe wurde nun langsam von mir in Rotation versetzt, indem ich die Spannung am Netzgerät langsam erhöhte. Mit zunehmender

⁹Die Lampe befindet sich zusammen mit der rotierenden Farbscheibe in einer „Black-Box“.

¹⁰Entsprechend groß ist das allgemeine Erstaunen, wenn bei rotierender Scheibe auf dem Schirm ein bunter Schattenverlauf zu beobachten ist.

Rotationsgeschwindigkeit offenbarten sich die schnell wechselnden Farben auf der Farbscheibe und dem Schirm, wie sie in Abbildung 4.2 zu erkennen sind. Ich erhöhte die Drehzahl so lange, bis sich die Farben auf der Scheibe und Schirm nur noch langsam veränderten. An dieser Stelle beendete ich die „Vorführung“ des Ausgangsphänomens und die Seminarteilnehmer begannen mit ihrer Arbeit an diesem Phänomen.

4.4.2. Beobachtungen und Fragestellungen

Die Beobachtungen, die von den Studierenden zu Beginn ihrer Untersuchungen gemacht werden, sind von der Art:

Studierende:

Die Pappscheibe wird von der Lampe angestrahlt und hinterlässt einen Schatten auf dem Schirm. Dieser Schatten ist zunächst grau. Ab einem gewissen Tempo der drehenden Pappscheibe wird der Schatten jedoch bunt und wechselt die Farben. Dreht sich die Pappscheibe noch schneller, wird der Schatten wieder grau...

oder

Studierende:

Mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit änderten sich die Farben der Scheibe und die des Schattens. Verschiedene Farben waren abwechselnd zu sehen. Das Auftreten der einzelnen Farbphasen war abhängig von der gewählten Geschwindigkeit.

Bei all diesen Beobachtungen wurde von den Teilnehmern erkannt, dass sowohl die Scheibe, als auch das Schattenbild auf dem Schirm „bunt“ erscheint. Da sie dies im Allgemeinen nicht erwarteten, zielten ihre ersten Fragen auf deren Ursache. Sie waren davon überzeugt, dass die Lampe etwas mit der Entstehung dieser Farben zu tun haben musste. Einige Gruppen setzten dies als eine selbstverständliche Tatsache voraus, andere überprüften dies experimentell, indem sie die rotierende Scheibe mit einer „normalen“ Reuterlampe ausleuchteten. In diesem Fall waren keine Farberscheinungen zu beobachten und das Schattenbild entsprach ihren zu Beginn des Experiments geäußerten Vorhersagen.

So wendeten sie sich zunächst der „Black-Box“ Anordnung zu. Da die Geräuscentwicklung der rotierenden, nicht sichtbaren Farbscheibe innerhalb des Lampengehäuses nicht unerheblich war, lies sich kaum verbergen, dass innerhalb des Gehäuses „etwas“ rotiert. Aus dieser Tatsache resultierte der Umstand, dass viele Gruppen bereits an dieser Stelle Vermutungen über den Inhalt des Gehäuses äußerten.

Studierende:

Es kann sich bei der vorliegenden Lichtquelle nicht nur um eine herkömmliche Glühlampe handeln.

Andere Teilnehmer interessierten sich überhaupt nicht für das laute Geräusch des rotierenden Gegenstandes:

Studierende:

In dem Gehäuse ist sicher ein Ventilator zur Kühlung der Lampe eingebaut.

Dennoch waren sich die Studierenden im Allgemeinen darüber einig, dass das Licht der Lampe in jedem Fall „besonderen Eigenschaften“ haben müsse, damit solch farbige Beobachtungen auf Scheibe und Schirm möglich seien. Aus dieser Situation heraus entwickelten sich Fragestellungen.

1. Wie wirkt sich anderes Licht auf das Phänomen aus?
2. Was befindet sich genau im Innern dieser Black-Box-Anordnung? und Wie kann man nachweisen, dass die Lampe zeitlich versetztes, farbiges Licht emittiert?
3. Wie ändern sich die Farberscheinungen, wenn die Farbe des Lichts verändert wird?
4. Was passiert, wenn man die Drehfrequenz der Scheibe ändert? bzw. Wann kann man stehende Farben beobachten?
5. Was passiert, wenn man die Form und Farbe der Scheibe verändert?
6. Was passiert, wenn man die Form und Farbe des Schirms verändert?
7. Ändert eine Variierung des Abstandes zwischen den Bauelementen etwas an den Beobachtungen?

Natürlich wäre es in dieser Situation am einfachsten gewesen, die Abdeckung der Lampe zu öffnen und so eine Antwort auf diese Frage zu finden. Meist bestand aber das Bedürfnis, Aussagen über das Innenleben der Lampe machen zu können, ohne diese zu öffnen. Zu diesem Zweck wurden ähnlich qualitative Beobachtungen angestellt, wie ich sie in Abbildung 4.3 angestellt habe. Einige Seminarteilnehmer konnten bei schnellen Kopfbewegungen farbige Lichterscheinungen beobachten. Im nächsten Schritt wurde die Drehzahl der rotierenden Scheibe so eingestellt, dass die Färbung konstant blieb. Die Farbe der Kreisscheibe und des Schirmbildes wurden festgehalten. Eine Gruppe sprach in diesem Zusammenhang von vier Farben.

Studierende:

Dann waren Schirm und Kreisscheibe unterschiedlich gefärbt. Die Farbkombinationen auf Schirm und Kreisscheibe sind wie folgt: Rot/Gelb, Blau/Grün, Gelb/Rot, Grün/Blau.

Damit sind die Farberscheinungen gemeint, die beobachtbar sind, wenn die Drehzahl der rotierenden Scheibe halb so groß ist wie die der Farbscheibe. In diesem Fall gibt es aber keine vollständige Ausleuchtung von Scheibe und Schirm mit einer bestimmten Farbe. Vielmehr sind Farbübergänge vom Rand der Scheibe zur Mitte hin zu beobachten.

4.4.3. Aspekte die von den Teilnehmern untersucht wurden

Bei meiner Vorführung des Phänomens erhöhte ich durch Vergrößerung der Spannung am Netzgerät langsam die Drehfrequenz der Kunststoffscheibe, bis die Frequenz der Kunststoffscheibe halb so groß war, wie die der Farbscheibe. In diesem Fall entstand man zum ersten Mal ein „stehendes“ Bild der Farben. Die Seminarteilnehmer untersuchten die Abhängigkeit der beobachtbaren Phänomene von der Frequenz möglichst genau. Da die Frequenz der Scheibe schwierig

4. Die rotierende (Farb-) Scheibe

Spannung in V	Beobachtung auf dem Schirm
0	schwarz
0,8	schwarzer Kernschatten mit dünner roter Umrandung
1,2	schwarzer Kernschatten, Rot, Grün, Grau
1,5	Wechsel von Rot, Blau und Grün dicht am schwarzen Kernschatten, sonst grau
2,0	Schwarzer Kernschatten und Farbwechsel von rot, blau und grün über die gesamte Fläche
3,9	Schwarzer Kernschatten und langsamer Farbwechsel in gleich bleibender Farbreihenfolge von Innen nach Außen (Rot, Blau, Gelb, Grün)
4,6	Grau

Tabelle 4.2.: Gruppe A: Beobachtete Farberscheinungen in Abhängigkeit von der Spannung des Motors der Kunststoffscheibe. Beschrieben werden Beobachtungen aus Sicht der Lampe.

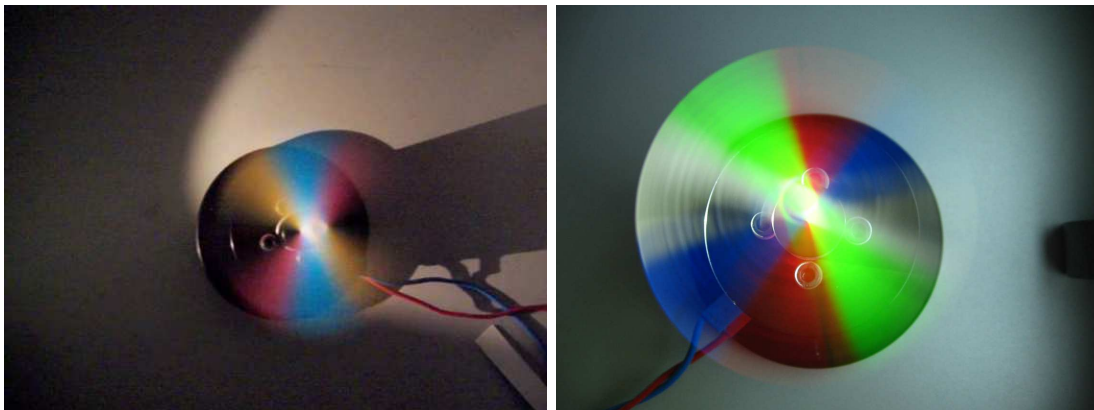


Abbildung 4.29.: Beim Blick von oben auf die Scheibe werden Farbaufspaltungen beobachtet.

Links: Ausleuchtung mit der Lampe.

Rechts: Ausleuchtung mit einem Beamer.

zu messen war, suchten sie sich einen entsprechenden Parameter, der zusammen mit der Frequenz der Scheibe wächst. Dazu bot sich die „Spannung“ des Netzgerätes an, an dem der Motor der Kunststoffscheibe angeschlossen war. Man ging davon aus, dass zwischen der Drehfrequenz der Scheibe und der Spannung am Netzgerät ein proportionaler Zusammenhang besteht. Die Spannung (und somit auch die Frequenz) der Kunststoffscheibe wurde systematisch erhöht und die gemachten Beobachtungen in tabellarischer Form protokolliert. Zwei Beispiele werden in Tabelle 4.2 und 4.3 dargestellt. In Tabelle 4.2 beschreibt eine Gruppe von Studierenden ihre Beobachtungen aus Sicht der Lampe. Dabei wird deutlich, dass die farbigen Erscheinungen nur bei bestimmten Spannungen (Frequenzen) beobachtbar sind.

Mit steigender Drehzahl entdeckten sie Farberscheinungen, die dann bei weiter steigender Spannung wieder verschwanden (Die Scheibe wird grau.). Diese Farberscheinungen wurden von den Teilnehmern genau beobachtet. Zunächst beobachtete man diese nur im mittleren Bereich der Scheibe (um den schwarzen Kernschatten), bevor sich die farbigen Bereiche bei höheren Spannungen über die gesamte Scheibe erstreckten. Sie beobachteten ebenfalls, dass die Farberschei-

Spannung in V	Beobachtung aus Richtung Lichtquelle
0,7	Scheibe weiß, Schatten dunkel
3,0	Scheibe weiß, Schatten um Kernschatten wechselt rot, blau
3,8	Kugel, einheitliche Farbwechsel gelb, grün, rot, blau. Wechsel von innen nach außen
4,0	Kugel, einheitliche Farbwechsel gelb, grün, rot, blau. Wechsel von außen nach innen

Spannung in V	Beobachtung von der Seite
0,7	Scheibe weiß
3,0	Scheibe blau und rot im Wechsel am Rand, innen weiß
3,8	Kugel, einheitliche Farbwechsel gelb, grün, rot, blau. Wechsel von innen nach außen
4,0	Kugel, einheitliche Farbwechsel gelb, grün, rot, blau. Wechsel von außen nach innen

Spannung in V	Beobachtung von Oben
0,7	keine Farben
1,0	rot, blau gestreift
2,3	rot, blau gestreift
2,7	deutliche blaue und rote Streifen rotieren im Uhrzeigersinn
3,0	dünne Streifen wechseln die Farben
3,8	Kreis: gelb, grün, rot, blau
4,0	zwei mal vier Farben

Tabelle 4.3.: Gruppe B: Beobachtete Farberscheinungen in Abhängigkeit von der Spannung des Motors der Kunststoffscheibe aus verschiedenen Blickrichtungen.

nungen im oberen Spannungsbereich langsam von innen nach außen wanderten. In diesem Bereich näherte sich die Frequenz der Scheibe langsam an die halbe Frequenz der Farbscheibe an¹¹. Tabelle 4.3 zeigt entsprechende Untersuchungen einer anderen Gruppe von Studierenden. Hier wurden im Gegensatz zum ersten Fall verschiedene Blickrichtungen auf die rotierende Scheibe berücksichtigt. Beide Gruppen untersuchten nahezu den gleichen Spannungs- bzw. Frequenzbereich der rotierenden Scheibe. Nachdem sie zum ersten Mal ein stehendes Farbbild beobachteten, erhöhten sie die Spannung und damit die Drehzahl nicht weiter.

Allerdings bemerkte die zweite Gruppe, dass eine weitere Erhöhung der Drehfrequenz eine Umkehrung des Farbverlaufes mit sich bringt. Die Farben verliefen zunächst von innen nach außen, blieben dann stehen und liefen schließlich von außen nach innen. Der Beobachtung dieses Aspektes folgten dann keine weiteren Untersuchungen. Die zweite Gruppe führte genauere Beobachtungen durch, indem sie auch die Blickrichtung auf die Scheibe veränderte. Es fällt auf, dass die Teilnehmer beim Blick von der Seite den gleichen Farbverlauf beobachten, wie aus Sicht der Lichtquelle. Es hat sich später im Abschlussgespräch herausgestellt, dass sie diesen Sachverhalt letztendlich nur deshalb beobachteten, weil sie davon überzeugt waren, dass der

¹¹Mit Hilfe der Projektionsdarstellungen kann man sich leicht klarmachen, dass die Farben von innen nach außen verlaufen, wenn $\omega \approx \Omega/2$ gilt und $\omega < \Omega/2$. Sie verlaufen für $\omega > \Omega/2$ von außen nach innen.

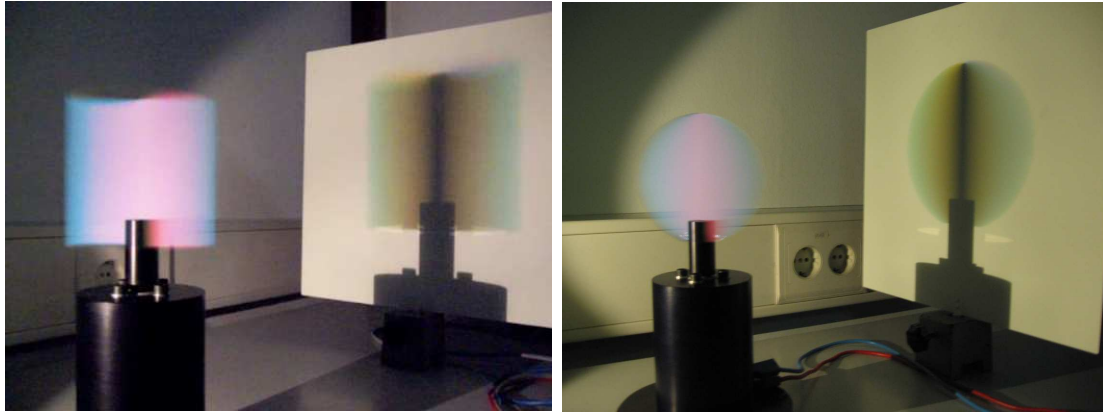


Abbildung 4.30.: Beobachtung der farbigen Erscheinungen mit unterschiedlichen Scheibenformen.

Links: Eine quadratische Scheibe zeigt eine senkrechte Farbänderung.

Rechts: Bei einer kreisförmigen Scheibe sind die Farbverläufe elliptisch (rechts).

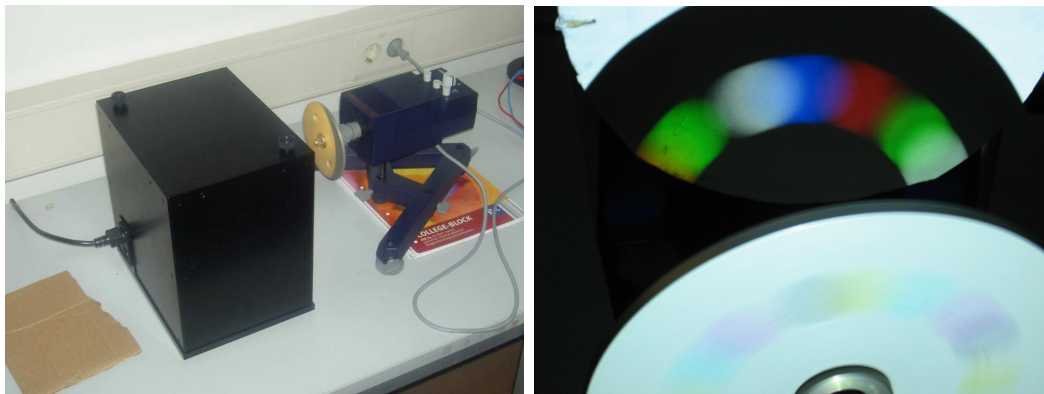


Abbildung 4.31.: Mit Hilfe einer schnell rotierenden Lochscheibe lassen sich die einzelnen Farbanteile ebenfalls leicht nachweisen.

Farbverlauf nicht von der Beobachtungsrichtung abhängig war. Im Abschlussgespräch, nachdem der Versuch bereits vollständig bearbeitet wurde, fragte ich sie, ob sie sich dieser Beobachtung sicher seien, und forderte sie auf, noch einmal hinzuschauen. Erst zu diesem Zeitpunkt erkannten sie eine Abhängigkeit der Farberscheinungen von der Blickrichtung des Beobachters.

Bei einer Variation der Blickrichtung wurde die rotierende Scheibe in den meisten Fällen von oben beobachtet. Dabei erkannte man sehr deutlich die Farbaufspaltungen. Die Frage, ob eine andere Form der Scheibe etwas an den beobachteten Phänomenen ändert, ist ein häufig anzutreffendes Untersuchungsziel. Ich stellte dünne Pappe zur Verfügung, damit sich die Teilnehmer eigene Formen herstellen konnten. Häufig schnitten sie quadratische Formen aus. Abbildung 4.30 zeigt ein Beispiel für die Beobachtungen, die dabei gemacht wurden. Bei der runden Scheibe erkennt man, im Gegensatz zur quadratischen Scheibe, deutlich elliptisch geformte Farbübergänge. Dieser kleine, aber feine Unterschied wurde bisher offenbar von keiner der Gruppen bemerkt oder diskutiert. Wie bereits erwähnt, bestand im Allgemeinen ein großes Interesse an der Funktionsweise der „Black-Box“. Aber wie kann man den „Inhalt“ dieser Box untersuchen, ohne diese dabei zu öffnen? Eine wichtige Frage der Teilnehmer, zu deren Lösung

unterschiedliche Ansätze herangezogen wurden.

Sie ersetzten die Scheibe durch zwei gegeneinander verklebte Spiegel gleicher Größe. Diese wurden mit Hilfe eines Glasschneiders aus einem größeren Exemplar ausgeschnitten. Bei entsprechender Rotationsgeschwindigkeit beobachtete eine Gruppe das vom Spiegel reflektierte Licht an der Wand in Form einer hellen bunten „Linie“. Eine andere Gruppe fotografierte das direkt vom Spiegel reflektierte Licht in einer Serie von Fotos. Da die Belichtungszeit der Kamera in gleicher Größenordnung wie die Beleuchtungszeit mit einer bestimmten Farbe lag, scheint der Spiegel nacheinander in den vier verschiedenen Farben zu leuchten (Abb. 4.32). Bei einer anderen (sehr ähnlichen) Untersuchungsmethode fotografierte man einfach das Licht der Lampe mit einer Digitalkamera. Sie beobachteten auf dem Foto kein „gelbes“ bzw. „weißes“ Licht der Lampe, sondern farbiges Licht (Abb. 4.33 oben rechts). Eine weitere Abwandlung dieses Experiments bestand darin, das Licht der Lampe durch eine schnell rotierende Lochscheibe fallen zu lassen. Auf einem unmittelbar dahinter positionierten Schirm zeigten sich dann ebenfalls einzelne Farbanteile (Abbildung 4.31 rechts).

Eine Gruppe ersetzte bei ihren Untersuchungen die Lampe durch einen Beamer. Nachdem der Beamer an ein Notebook angeschlossen wurde, projizierte man eine weiße Fläche auf einen Schirm. Die rotierende Scheibe positionierte man zwischen Beamer und Schirm. Die Studierenden erwarteten Farbaufspaltungen der Form Rot, Grün, Blau. Zu ihrer Überraschung zeigte sich bei der Beobachtung der rotierenden Scheibe von oben eine Ansicht gemäß Abbildung 4.29 rechts. Es war aus Sicht der Studierenden sehr verwunderlich, dass offensichtlich ein Anteil „Weiß“ mit hinzugemischt wird. Daher versuchten sie, ausgehend von dieser Frage, nähere Informationen über die Funktionsweisen eines solchen Beamers zu bekommen. Da es nicht möglich war, den Beamer zu öffnen, recherchierte man im Internet über die Technologie dieser Geräte. Die Recherche nahm relativ viel Bearbeitungszeit in Anspruch, so dass sich die Gruppe hauptsächlich damit beschäftigte. Es folgten aber auch weitere Untersuchungen zu Fragen wie:

Studierende:

Wie ändern sich die Farberscheinungen, wenn der Beamer kein weißes, sondern farbiges Licht ausstrahlt?

Dazu wurde einfach eine beispielsweise rote Fläche auf den Schirm projiziert. Dabei beobachtet man beispielsweise beim Blick von oben, dass die Farben Grün und Blau nur mit sehr geringen Anteilen vorkommen.

Diese Art der Untersuchung wurde übrigens auch bei der Lampe vorgenommen. Dabei wurde entweder einfarbiges Licht durch entsprechende Farbfilterfolien erzeugt, die vor die Lampe gehalten wurden, oder die Scheibe wurde farbig gestaltet. Interessant sind dazu Äußerungen von Studierenden wie:

Studierende:

Hier wurde der Versuchsaufbau des Grundversuches dahin gehend geändert, dass statt der runden, weißen Scheibe eine farbige blaue Scheibe verwendet wurde. [...] Wir haben farbige Folie vor die Lampe gehalten [...] Auch in diesem Fall waren die Beobachtungen identisch zu denen des Grundversuches.

Die Studierenden nahmen offenbar keinerlei Änderungen in ihren Beobachtungen wahr, wenn sie farbige Folie oder eine farbige Scheibe verwendeten. Im Fall der farbigen Scheibe lag das

4. Die rotierende (Farb-) Scheibe

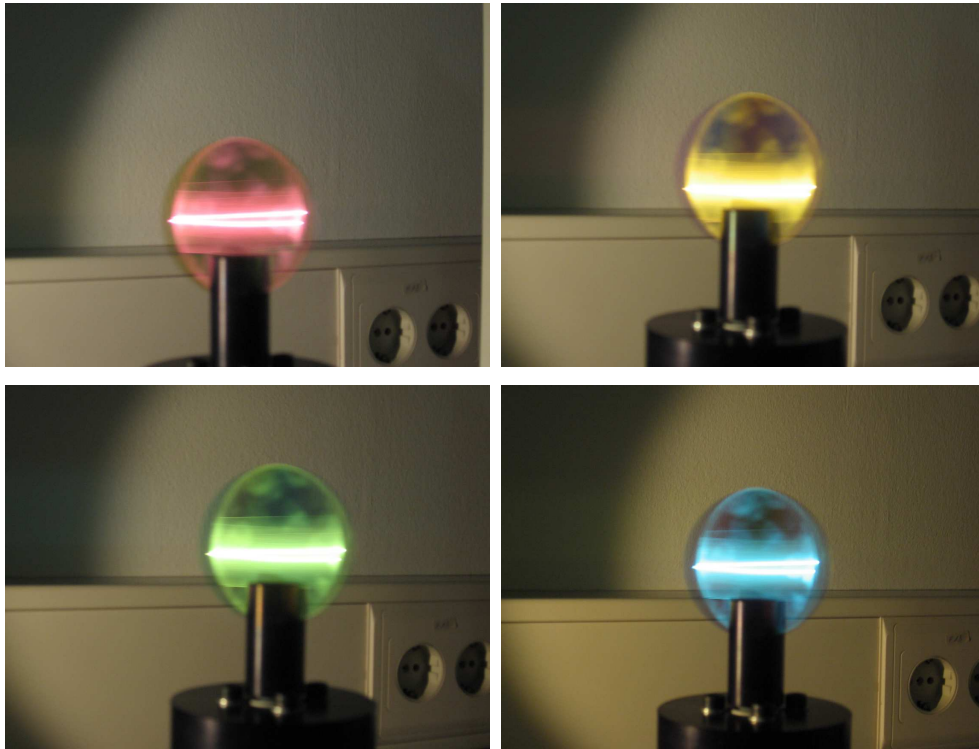


Abbildung 4.32.: Durch fotografieren des reflektierten Lichts eines rotierenden Spiegels kann man die zeitlich versetzte Ausleuchtung mit verschiedenen Farben nachweisen.

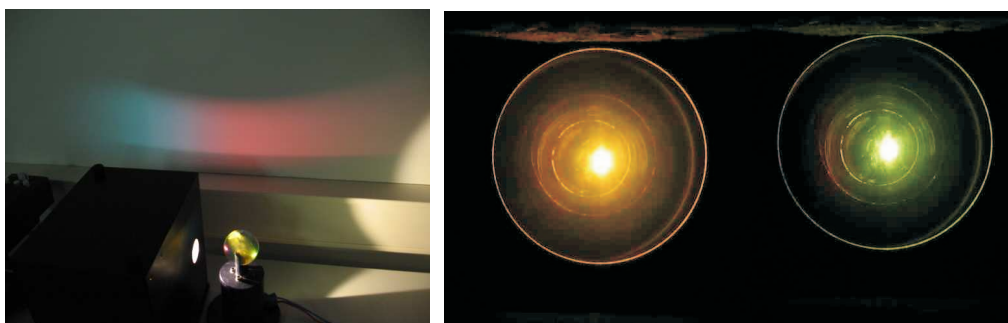


Abbildung 4.33.: **Links:** Durch Ersetzen der Kunststoffscheibe durch einen Spiegel kann man an der Wand ein breites Farbspektrum beobachten.
Rechts: Einzelne Farben der rotierenden Farbscheibe lassen sich mit Hilfe einer Digitalkamera mit sehr kurzer Belichtungszeit „einfangen“.

wahrscheinlich daran, dass sie nur auf den Schatten der Scheibe achteten.

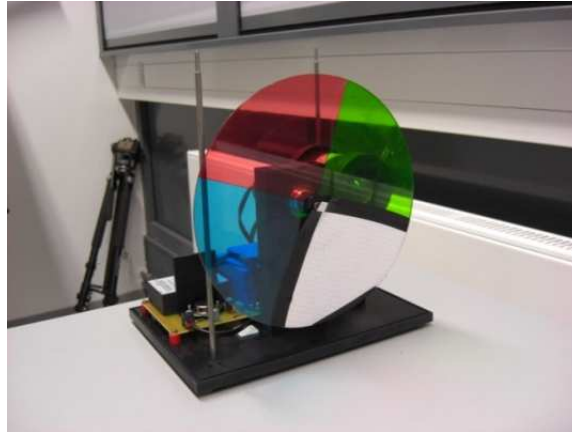


Abbildung 4.34.: Durch Abkleben des gelben Segments auf der Farbscheibe erhoffte man sich weißes Licht zu erhalten.

Eine Gruppe, die sich ebenfalls mit den Farben der Scheibe beschäftigte bemerkte, dass die Scheibe offenbar aus den Farben Rot, Grün, Blau und Gelb besteht. Da das Licht der rotierenden Scheibe gelblich gefärbt ist, schlussfolgerte die Gruppe, dass diese Färbung durch Rot, Grün, Blau=Weiss plus einem Gelbton zu Stande kommen müsse. Das gelbe Segment der Scheibe wurde daher als „Störfaktor“ angesehen. Sie klebten daraufhin das gelbe Segment der Farbscheibe mit Papier ab, in der Hoffnung dadurch weißes Licht zu erhalten. Der gewünschte Effekt trat nicht ein, denn erstens erhielt die Scheibe dadurch eine Unwucht und lief nicht mehr sauber und zweitens entsprachen die Farben auf der Scheibe nicht den Grundfarben. Ihre Summe kann also nicht Weiß ergeben.

Aufgrund einer Unwucht, die die Pappscheibe beim (nicht optimalen) Einspannen in die Vorrichtung möglicherweise erhält, kann es bei hohen Drehzahlen zu Verbiegungen der Scheibe und somit zu komplexen dreidimensionalen Figuren kommen. Dies beobachtete eine Gruppe und dokumentierte dies.

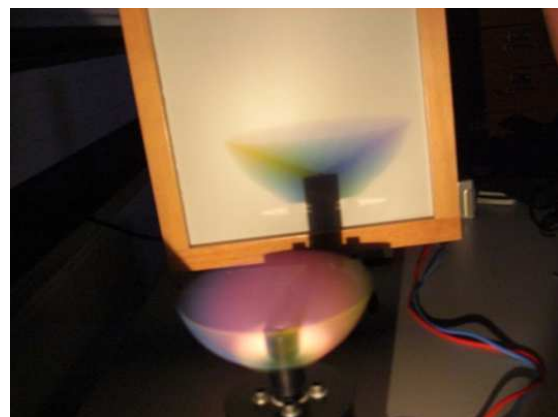
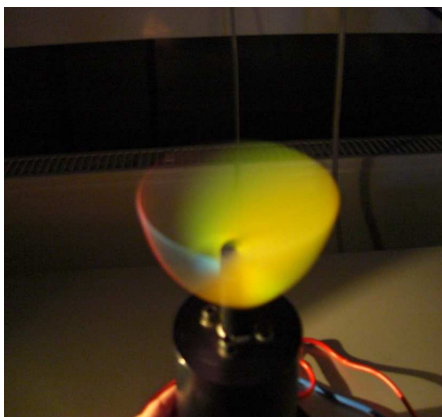


Abbildung 4.35.: Hat die Pappscheibe eine zu starke Unwucht, so verbiegt sie sich bei hohen Drehzahlen teilweise sehr deutlich. Dabei kann die Scheibe komplexe dreidimensionale Figuren beschreiben.

Die rotierende Pappscheibe beschreibt in diesem Fall aufgrund einer Verbiegung bei hohen Drehzahlen die Form eines Kelchs. Die Farberscheinungen auf der Scheibe und auf dem Schirm werden dadurch entsprechend kompliziert (Abb. 4.35).

4.4.3.1. Zur quantitativen Bestimmung der Drehzahl

Die quantitative Bestimmung der Drehzahlen der rotierenden Scheiben erwies sich in vielen Fällen für die Seminarteilnehmer als eine große Hürde. Zwar haben die Studierenden nach eigenen Angaben bereits Erfahrungen mit Geschwindigkeitsmessungen, jedoch beschränken diese sich auf geradlinige Bewegungen. Daher war es für mich an dieser Stelle praktisch immer erforderlich einen geeigneten Impuls zu geben.

Im Allgemeinen teilte ich ihnen mit, dass man mit einem so genannten Stroboskop die Geschwindigkeit (Frequenz) von schnell rotierenden Körpern messen kann. Die Studierenden hatten darauf hin die Aufgabe, sich selbst über das Funktions- und Messprinzip eines solchen Stroboskops zu informieren. Nachdem dies geschehen war, stellte ich ihnen ein Exemplar aus unserer Sammlung zur Verfügung.

Nachdem die Teilnehmer sich vornehmlich im Internet über die Funktionsweise eines Stroboskops informiert hatten, war es ihnen ohne nennenswerte Schwierigkeiten möglich, mit dem Exemplar aus der Sammlung Messungen durchzuführen. Nur in wenigen Ausnahmefällen war eine weitere Einweisung in die genaue Funktionsweise des Gerätes erforderlich. Dennoch ist das Durchführen von konkreten Messungen alles andere als trivial. Die Messungen verlaufen derart, dass die Blitzfrequenz des Stroboskops so eingestellt wird, dass ein „stehendes“ Bild des rotierenden Gegenstandes entsteht. Es gibt aber im niedrigen Frequenzbereich viele Möglichkeiten dies einzustellen, nämlich wenn die Frequenz des rotierenden Gegenstandes f_g ein Vielfaches der Blitzfrequenz f_b ist. Genauer: Ein stehendes Bild entsteht, wenn gilt:

$$f_b = \frac{2}{n} f_g \quad n = 2, 3, 4, \dots \quad (4.8)$$

Das bedeutet: Bei fester Rotationsfrequenz des Gegenstandes (der Scheibe) f_g ist bei kleinen Stroboskopfrequenzen f_b der Faktor n groß. Für kleine Stroboskopfrequenzen lässt sich demnach immer eine Situation finden, in der man ein stehendes Bild beobachten kann. Die „richtige“ Frequenz wird gemessen, wenn $n = 2$ ist. Dies erreicht man, indem man die Stroboskopfrequenz bewusst sehr groß einstellt, diese dann langsam absenkt, *bis zum zweiten Mal ein stehendes Bild beobachtet wird*. In diesem Fall (und nur in diesem Fall) stimmen beide Frequenzen überein.

Es gab mehrere Situationen, in denen Studierende die „falsche“ Frequenz gemessen haben¹². Ich habe das Problem dann in der abschließenden Diskussion zu diesem Versuch angesprochen und mit den Teilnehmern ausführlich diskutiert.

Einer Gruppe hatte eine abweichende und interessante Idee die Drehzahl zu messen. Um den Schaft der rotierenden Scheibe wurde eine dünne Kordel befestigt. Die Länge betrug etwa 5m. Setzte man die Scheibe in Bewegung, so wickelte sich die Kordel um den Schaft. Am anderen Ende der Kordel wurde eine Markierung befestigt. Die Idee bestand nun darin, dass sich bei Rotation der Scheibe die Kordel um den Schaft aufwickelt und sich die Markierung dabei quer durch den Raum bewegt. Lässt man die Markierung eine bekannte Strecke durchlaufen und misst die dafür benötigte Zeit, so kann bei Berücksichtigung des Schaftdurchmessers die

¹²In der Regel wurde sie um Faktor 2 zu klein gemessen.

Drehgeschwindigkeit ermittelt werden. Leider war dieser Versuch nicht von Erfolg gekrönt. Die Bewegung ist zu schnell und die Messmethode zu ungenau.

4.4.4. Übersicht über die Aspekte des Phänomens

An dieser Stelle sollen noch einmal alle Aspekte zusammengefasst werden, die das Phänomen „rotierende Farbscheibe“ bietet und insbesondere welche davon von den Studierenden bearbeitet wurden.

Aspekt des Phänomens	wurde beobachtet	wurde näher untersucht
Scheibe farbig	ja	ja
Schatten farbig	ja	ja
Zusammenhang zwischen Farben	ja	teilweise
andere Scheibenformen	ja	nein
Frequenz variiert	ja	ja (bis $\Omega/2$)
Abschattung	nein	nein
Elliptische Farben (Scheibe)	nein	nein
Farbverlauf innen/außen	teilweise	nein
Blick von der Seite	teilweise	nein
Blick von oben	ja	ja
andere Lichtquelle	ja	ja
andere Gegenstände	teilweise	nein
Farbfilter	ja	ja
Verbiegung und komplexe Figuren	teilweise	nein
einseitig schwarze Scheibe	nein	nein
Wimpel-Scheibe	nein	nein
Beamer als Lichtquelle	einmal	einmal

Tabelle 4.4.: Zusammenstellung aller Aspekte des Phänomens „rotierende Farbscheibe“, die von den Seminarteilnehmern beobachtet und untersucht *werden können* bzw. beobachtet und untersucht *wurden*.

4.4.5. Zusammenstellung der von mir bereitgehaltenen Materialien

Im Laufe meiner bisherigen Untersuchungen an diesem Phänomen habe ich Materialien zusammengestellt, die Studierende im Verlauf ihrer experimentellen Tätigkeiten an diesem Phänomen verlangen könnten. Für den Fall, dass der Wunsch besteht, die Scheibe mit Licht einer bestimmten Farbe auszuleuchten, wurden Farbfilter und Farbfolien bereitgehalten. Die Filter bestehen zum größten Teil aus gefärbtem Glas, daher ist die Qualität¹³ dieser Filter nicht sehr gut. Aus diesem Grund habe ich zusätzlich einen Interferenzfilter von sehr hoher Qualität ($\Delta\lambda \sim 1\text{nm}$) für grünes Licht angeschafft. Darüber hinaus können gegebenenfalls aus den DIN-A4 Farbfolien durch Ausschneiden Filter beliebiger Größe und Form hergestellt werden.

Die rotierende Scheibe kann durch andere Formen ersetzt werden. Aus weißer Pappe können durch Ausschneiden beliebige Formen hergestellt und in die Halterung eingespannt werden. Im

¹³Je kleiner das Wellenlängenintervall $\Delta\lambda$ ist, welches von einem Filter durchgelassen wird, desto höher ist seine Qualität.

späteren Verlauf habe ich zusätzlich Pappe bereitgestellt, die auf einer Seite geschwärzt wurde. Mit ihr habe ich eine später entwickelte Modellvorstellung auf Konsistenz geprüft. Um das Reflexionsverhalten bei unterschiedlichen Farben der rotierenden Scheibe untersuchen zu können, wurde farbige Pappe bereitgehalten.

Es ist möglich einen Spiegel in die drehbare Halterung einzuspannen. Nachdem eine Gruppe diesen Wunsch äußerte, habe ich in der Feinmechanikwerkstatt eine entsprechende Vorrichtung anfertigen lassen, die sich an der drehbaren Halterung befestigen lässt.

1. Farbfilter und farbige Folien
2. Verschiedene Arten gefärbter Pappe.
3. Spiegel unterschiedlicher Größe
4. Lochscheibe und Elektromotor
5. Plexiglasscheiben
6. DLP-Beamer
7. Stroboskop

4.5. Fazit

Die rotierende Farbscheibe gehört zu der Art von physikalischen Phänomenen, bei dem sich die Fülle von Aspekten erst im Laufe einer intensiven Auseinandersetzung mit dem Phänomen offenbaren. Diese Erfahrung musste ich im Laufe meiner Ergründung des Phänomens machen. Das gleiche gilt auch für die Studierenden. Aufgrund der vergleichsweise kurzen Bearbeitungszeit von rund vier Wochen, blieben viele Aspekte des Phänomens unbeobachtet. Viele davon werden nur dann beobachtet, wenn ein bestimmter „geschärfter Blick“ auf das Phänomen bereits vorliegt (Farben beim Blick von der Seite). Meinem Eindruck nach empfinden die Studierenden das Phänomen als eine aus ihrer Sicht „interessante“ und möglicherweise auch „motivierende“ Ausgangssituation. In Gesprächen bezeichneten sie das Phänomen als „sehr ästhetisch und anmutend“. Besonders in der Phase, als das Phänomen neu in das Seminar integriert wurde und daher noch nicht viele Untersuchungsmaterialien vorrätig waren, ergriffen viele Gruppen die Initiative und brachten eigene Untersuchungsmaterialien von zu Hause aus mit. Viele berichteten mir von zahlreichen Diskussionsrunden und Recherchen außerhalb des Seminars.

Studierende:

Ich habe gestern den ganzen Abend im Internet nach diesem Phänomen gesucht, habe aber nichts gefunden. [...] Warum steht so etwas in keinem Lehrbuch?

Solche und ähnliche Aussagen zeigen, dass die Studierenden sich sehr wohl auch außerhalb des Seminars intensiv mit diesem Phänomen auseinandergesetzt haben. In den meisten Fällen war es für mich nicht nötig in die Untersuchungen der Gruppen in Form von Hilfestellungen einzugreifen. Lediglich der Umgang mit dem Stroboskop erwies sich einer kurzen Einführung bedürftig. Manchmal kam auch die Frage:

Studierende:

Wie kann man die Geschwindigkeit eines schnell rotierenden Gegenstandes messen?

Ich forderte sie zunächst auf, sich selbst darüber zu informieren. Danach stellte ich ihnen das Stroboskop vor und erläuterte ihnen das zu Grunde liegende Messprinzip. Die Messung an sich ist schon schwierig genug, da man sozusagen die „richtige“ Frequenz finden muss.

Insgesamt handelt es sich bei dem Phänomen der rotierenden Farbscheibe um ein interessantes Phänomen, welches nach meiner Erfahrung mit wenigen Zusatzmaterialien auskommt, viele unterschiedliche Fragestellungen initiiert und an dem eine große Fülle von Aspekten beobachtbar sind. Deshalb halte ich das Phänomen für eine in meinem Sinne offene Arbeitsweise für sehr geeignet.

Ein Phänomen zum Spannungsbegriff

Anhand einer aktuellen Publikation von Pelster und Hüttl [63] wurde mir (zum ersten Mal) deutlich, wie kompliziert und schwierig die Begriffe der elektrischen Spannung, der Stromstärke und der Induktion zu verstehen und zu handhaben sind. In der Literatur wird an vielen Stellen auf Fehlvorstellungen von Lernenden verwiesen, die im Zusammenhang mit diesen Begriffen stehen (z.B. [56, 32]). Es gibt mittlerweile eine Reihe empirischer Untersuchungen dieser Problematik (z.B. [48]).

Pelster und Hüttl diskutieren einen überraschenden Versuch, welcher bereits 1969 von Moorcroft [60] und 1982 von Romer [70] publiziert wurde. Eine Spule mit Eisenkern liegt auf einer ebenen Unterlage und wird von Wechselstrom durchflossen. Um den Kern herum befindet sich eine runde Draht-Leiterschleife, in die zwei Widerstände eingelötet wurden. Das im Allgemeinen als interessant wahrgenommene Phänomen sind die unterschiedlichen Anzeigewerte der Voltmeter (Abb.5.1).

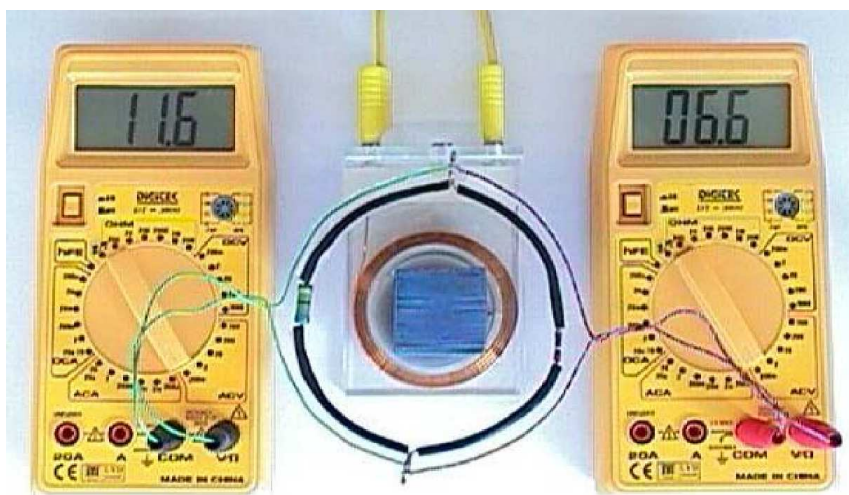


Abbildung 5.1.: Aufbau des Experiments zum Spannungsbegriff nach Pelster und Hüttl [63].

5.1. Beschreibung des Phänomens

Ich habe daraufhin das Phänomen auf einem Steckbrett nachgebaut (Abb. 5.2) . Dadurch ist es möglich, bestimmte Parameter, wie die Widerstandswerte oder die Größe der Leiterschleife, gezielt zu verändern.

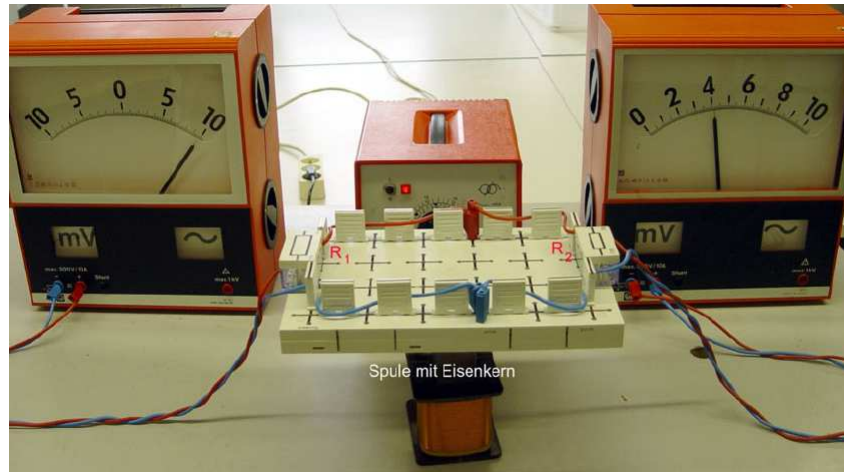


Abbildung 5.2.: Das Phänomen zum Spannungsbegriff, hergestellt aus Lehrmittelmateriale. Obwohl die Voltmeter an denselben Punkten angeschlossen sind, zeigen sie unterschiedliche Messwerte.

Die Spule samt Eisenkern steht auf dem Tisch. Unmittelbar auf dem Kern liegend befindet sich das Steckbrett, auf dem eine rechteckige Leiterschleife gesteckt wurde, die die beiden Widerstände R_1 und R_2 enthält. Rechts und links von dieser Anordnung stehen zwei Demonstrations-Mikrovoltmeter, die an denselben Punkten innerhalb des Steckbrettes angeschlossen sind. Es zeigt sich auch in dieser Version des Versuches, dass beide Voltmeter unterschiedliche Spannungswerte anzeigen. Dieser Sachverhalt wird einen unvorbereiteten Laien kaum beeindrucken, denn es sind bestimmte Vorkenntnisse über den Spannungsbegriff nötig, um hier einen Erklärungsbedarf zu erkennen.

5.1.1. Notwendige Vorkenntnisse

Was versteht man unter dem Begriff der elektrischen Spannung? In Schulbüchern der Oberstufe findet man Definitionen der Art:

Die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten A und B eines Feldes gibt an, wie viel Energie pro Ladung bei der Bewegung zwischen diesen Punkten zugeführt wird [10].

Dieselbe Definition aus einem Fach-Lehrbuch:

Die elektrische Spannung U_{12} zwischen zwei Punkten P_1 und P_2 ist gleich der Differenz der elektrischen Potentiale im Punkt P_1 und P_2 . Sie ist gleich der auf die Ladung bezogenen Arbeit, die beim Transport der Ladung von P_1 nach P_2 geleistet wird. Die elektrische Spannung ist unabhängig vom gewählten Weg zwischen den Punkten P_1 und P_2 [96].

Natürlich beschreiben beide Definitionen den gleichen Sachverhalt. Die Definition des Fach-Lehrbuches beinhaltet zusätzlich eine wichtige Aussage, die in der Schulbuch-Definition nur implizit vorausgesetzt wird: Die Forderung, dass die elektrische Spannung unabhängig vom durchlaufenen Weg zwischen den beiden Punkten ist, zwischen denen sie gemessen wird.

Diese Eigenschaft der Spannung wird in der Regel als Selbstverständlichkeit vorausgesetzt. Soll eine Spannung zwischen zwei Punkten A und B mit einem Voltmeter gemessen werden, so spielt es keine Rolle, wie die Anschlusskabel des Voltmeters im Raum verlegt sind. Der Anzeigewert des Voltmeters hängt nur von den beiden Anschlusspunkten A und B ab. Offensichtlich ist diese Gesetzmäßigkeit im oben genannten Versuch nicht gültig.

Da sich keine Quelle im Kreis befindet, muss die gemessene Spannung durch „Induktion“ durch die Spule im Kreis entstehen. In diesem Zusammenhang ist zumindest in der Anfangsphase eine Schulbuch-Definition für die elektromagnetische Induktion ausreichend.

Eine Induktionsspannung entsteht, wenn sich der magnetische Fluss durch eine Leiterschleife ändert [10].

In diesem Satz wird keine Aussage über Vorzeichen der induzierten Spannung oder deren Richtungssinn gemacht. Dies ist zumindest in der Anfangsphase der Untersuchungen auch nicht nötig. Wichtig ist im Moment nur zu verstehen, warum überhaupt eine Spannung gemessen werden kann.

5.2. Eigene Überlegungen

Als ich begann, mich mit diesem Phänomen näher zu beschäftigen, stand für mich zunächst nur eine Frage im Vordergrund: Wie kommt es zu den unterschiedlichen Anzeigewerten der Voltmeter? Es zeigte sich sehr schnell, dass zu deren Klärung eine Reihe weiterer Fragen im Vorfeld beantwortet werden müssen.

Erste qualitative Untersuchungen ergaben sich aus einem „seltsamen“ Verhalten der Anzeigewerte bei Berührung der Anschlusskabel der Messgeräte. Bewegt man ein beliebiges Anschlusskabel ein wenig hin und her, so verändert sich die Anzeige des angeschlossenen Messgerätes zum Teil erheblich. Dabei kann es entweder passieren, dass sich der Anzeigewert praktisch verdoppelt oder dass unter Umständen überhaupt keine Spannung messbar ist. Wie sich die Anzeigewerte bei Veränderung der Kabelführungen verändern, ist praktisch nicht vorhersehbar¹. Im Versuchsaufbau von Pelster in Abbildung 5.1 erkennt man, dass die Anschlusskabel der Messgeräte sehr nahe um die Leiterschleife herum verlegt und im weiteren Verlauf sogar verdreht wurden. Ich erkannte den Sinn, nachdem ich auch an meinem Versuchsaufbau eine ähnliche Führung der Kabel wählte (Abb. 5.2). Es zeigte sich, dass in diesem Fall die Anzeigewerte der Messgeräte beim Bewegen der Kabel praktisch konstant bleiben. Diese besondere Führung der Kabel sorgt demnach im Experiment (wie auch immer) für reproduzierbare Ergebnisse. An dieser Stelle erschien mir eine etwas systematischere Vorgehensweise angebracht, die zur Klärung folgender Fragen führen sollte:

1. Warum werden überhaupt Spannungen gemessen?

¹Es wird sich im späteren Verlauf der Untersuchungen noch zeigen, dass in einem gewissen Rahmen durchaus verlässliche Vorhersagen möglich sind.

2. Warum führt eine Bewegung der Anschlusskabel der Messgeräte zu einer Änderung der Spannungswerte an den Messgeräten?
3. Wie hängen die Anzeigewerte von der Verlegung der Anschlusskabel ab?
4. Warum sind die Messwerte in der Pelster-Anordnung auch beim Bewegen der Anschlusskabel praktisch konstant?

Ich ging davon aus, dass es sinnvoll (und auch nötig) sei, das Phänomen nacheinander auf verschiedenen Ebenen zu verstehen. Die Frage, warum unterschiedliche Spannungswerte gemessen werden, befindet sich auf einem viel höheren Niveau als die Frage, warum überhaupt Spannungen messbar sind. Die Antwort auf die zweite Frage kann allein durch qualitative Überlegungen gegeben werden.

Im betrachteten Stromkreis befinden sich zwei Widerstände. Eine Spannung kann nur dann über den Widerständen gemessen werden, wenn durch diese Strom fließt. Da sich keine herkömmliche Quelle im Stromkreis befindet, kann dieser Strom nur durch Induktion in diesem Kreis entstehen. Offensichtlich wird diese Aufgabe durch die von Wechselstrom durchflossene Spule, die unter dem Kreis liegt, übernommen. Gemäß der vorstehenden Schulbuchdefinition der Induktion tritt in einem Stromkreis eine Induktionsspannung auf, wenn sich der magnetische Fluss durch diesen Kreis verändert. Das Magnetfeld der Spule ändert sich ständig, da sie von Wechselstrom durchflossen wird, und somit im Kreis mit den beiden Widerständen ein Strom induziert wird. Dadurch können Spannungen über den Widerständen gemessen werden. Natürlich ist diese Erklärung bei weitem nicht ausreichend, da einerseits eine Reihe von Fragen unbeantwortet bleiben und gleichzeitig neue Fragen entstehen. Beispielsweise wird immer noch nicht verständlich, warum zwischen gleichen Punkten unterschiedliche Spannungswerte gemessen werden. Außerdem scheint es einen Widerspruch zur bekannten Kirchhoff'schen Maschenregel zu geben, da die Summe der Teilspannungen innerhalb des Kreises nicht null ist. Offensichtlich wird es an dieser Stelle nötig, einen genaueren Blick auf den Spannungsbegriff und die mit ihm unmittelbar zusammenhängenden Gesetzmäßigkeiten zu werfen.

5.2.1. Elektrisches Potential und Definition der elektrischen Spannung

In der Elektizitätslehre unterscheidet man analog zur Mechanik zwischen statischen und dynamischen Phänomenen. Während statische Phänomene unabhängig von der Zeit immer in gleicher Weise beobachtbar sind, gilt dies im dynamischen Fall nicht mehr. Wir können daher Elektro- und Magnetostatik unter den Oberbegriff „zeitunabhängige Phänomene“ einordnen. Alle auftretenden Größen wie Stromstärke, Spannung oder Magnetfeld sind hier zeitlich konstant. Betrachten wir zunächst nur den zeitunabhängigen Fall, so existiert eine physikalische Größe ϕ , die man elektrisches Potential nennt². Sie ist ein Maß für die potentielle Energie einer Ladung in einem konstanten elektrischen Feld.

Das elektrische Potential $\phi(\vec{r})$ in einem Punkt in einem elektrischen Feld \vec{E} ist die potentielle Energie einer Probeladung q dividiert durch diese Probeladung. Das Potential hängt bei vorgegebenem elektrischen Feld und festgelegtem Bezugspunkt \vec{r}_0 nur vom Ort \vec{r} ab. Jeder Weg C

²Man kann auf mathematischem Weg zeigen, dass im zeitunabhängigen Fall (und nur dann) dieses elektrische Potential existiert.

von \vec{r}_0 nach \vec{r}_1 liefert denselben Wert für das elektrische Potential.

$$\phi(\vec{r}) = \frac{W_{pot}(\vec{r})}{q} = - \int_{\vec{r}_{0,C}}^{\vec{r}} \vec{E} \cdot d\vec{r} = - \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (5.1)$$

Die elektrische Spannung U_{12} zwischen zwei Punkten \vec{r}_1 und \vec{r}_2 ist gleich der Differenz der beiden elektrischen Potentiale in diesen Punkten $\phi(\vec{r}_1)$ und $\phi(\vec{r}_2)$ [96].

$$U_{12} = \phi(\vec{r}_2) - \phi(\vec{r}_1) = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (5.2)$$

$$U_{12} = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (5.3)$$

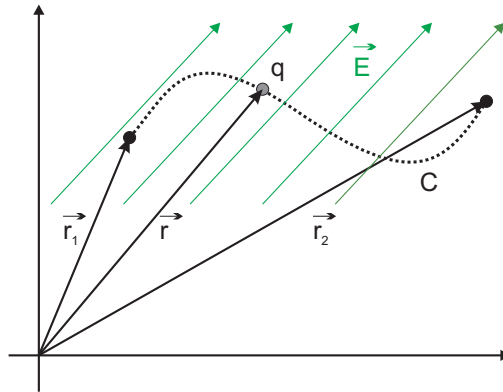


Abbildung 5.3.: Die Spannung ist ein Maß für die Energie, die zur Verschiebung einer Probeladung q in einem elektrischen Feld E benötigt wird.

Somit ist die Spannung ein Maß für die Energie, die zur Verschiebung einer Probeladung in einem elektrischen Feld zwischen zwei Punkten \vec{r}_1 und \vec{r}_2 benötigt wird. Dabei ist es nicht von Bedeutung, auf welchem Weg C man vom Punkt \vec{r}_1 nach \vec{r}_2 gelangt, da diese Annahme bereits bei der Definition des Potentials Voraussetzung war. Diese Wegunabhängigkeit ist gleichbedeutend mit der Forderung, dass $U_{12} + U_{21} = 0$ sein muss:

$$U_{12} + U_{21} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0 \quad (5.4)$$

Die Spannung entlang eines geschlossenen Weges C verschwindet demnach. Dies ist die bekannte Kirchhoff'sche Maschenregel. Es gibt nun zwei wesentliche Punkte, die aus diesem Abschnitt hervorgehen und die für die weiteren Betrachtungen von hoher Bedeutung sind.

1. Da die Definition der elektrischen Spannung über das Potential erfolgt, ist diese (zunächst) nur für den statischen (zeitunabhängigen) Fall definiert.
2. Die aus der Wegunabhängigkeit hervorgehende Kirchhoff'sche Maschenregel ist in der Regel auch nur für den statischen Fall richtig.

Diese Tatsache war mir bis zu diesem Punkt noch nicht bewusst. Das bedeutet nämlich, dass nur in Kreisen, in denen ein zeitlich konstanter Strom fließt, die Kirchhoff'sche Maschenregel (5.4) gültig ist und dass die Spannung nur in solchen Fällen durch die oben stehenden Definitionen definiert werden kann. Daraufhin stellte sich mir sofort die Frage, wie denn die Spannung im zeitabhängigen Fall definiert sei und ob eine Definition überhaupt möglich ist. Im oben genannten Einstiegsversuch liegt in jedem Fall eine Zeitabhängigkeit vor, da der im Kreis fließende Induktionsstrom durch ein periodisch wechselndes Magnetfeld generiert wird. Der Induktionsstrom und alle Größen, die aus ihm folgen, müssen demnach ebenfalls periodisch sein. Es müssen demnach unbedingt folgende Fragen beantwortet werden:

1. Wie ist die Spannung im zeitabhängigen Fall definiert?
2. Was wird im Einstiegsversuch überhaupt von den Voltmetern gemessen?

5.2.2. Elektromagnetische Induktion

Das Induktionsgesetz wurde von Michael Faraday gefunden und von James Clerk Maxwell erstmals in einer mathematischen Weise formuliert. Man kennt es heute auch als die zweite Maxwell'sche Gleichung.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\dot{\Phi} \quad (5.5)$$

Auf der rechten Seite der Gleichung steht die zeitliche Ableitung (zeitliche Änderung) des so genannten magnetischen Flusses³ $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$ dar. Der magnetische Fluss ist ein Maß für die Magnetfeldstärke, die durch die von der Leiterschleife C aufgespannten Fläche greift.

Durch die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses wird in der Leiterschleife ein Strom (Stromdichte \vec{j}) induziert, der aufgrund des elektrischen Widerstandes des Leiters ein elektrisches Feld \vec{E} innerhalb der Leiterschleife erzeugt. Die Gleichung (5.5) legt eine andere Sprechweise nahe: Durch $\dot{\Phi}$ wird ein (ringförmiges) elektrisches Feld erzeugt, das einen Strom hervorbringt. Die beiden Größen \vec{j} und \vec{E} sind durch das Ohm'sche Gesetz (Anhang A.2) miteinander verknüpft.

Vergleicht man die Maschenregel (5.4) und das Induktionsgesetz unmittelbar miteinander, so stellt man fest, dass beide Beziehungen mit den linken Seiten übereinstimmen. Im Induktionsgesetz ist die rechte Seite der Gleichung von null verschieden. Hier steht die (negative) zeitliche Änderung des magnetischen Flusses. Im zeitunabhängigen Fall, beispielsweise bei konstanten Magnetfeldern, verschwindet dieser Beitrag, und das Induktionsgesetz geht in die bekannte Maschenregel über.

³Diese Gleichung stellt einen Spezialfall dar. Es wird vorausgesetzt, dass das Magnetfeld die Leiterschleife homogen durchsetzt.

Somit kann das Induktionsgesetz auch als allgemeine Maschenregel für zeitabhängige Phänomene interpretiert werden. Die bekannte Maschenregel geht aus ihr hervor, wenn zeitunabhängige Phänomene betrachtet werden [7].

Nun wissen wir, dass bei Betrachtungen unseres Einstiegsexperiments die „allgemeine Maschenregel“ heranzuziehen ist, aber welche Auswirkungen hat dies auf den Spannungsbegriff? Bei der Definition der Spannung im Kapitel 5.2.1 wurde die „Wegunabhängigkeit“ besonders hervorgehoben. Diese Wegunabhängigkeit ist eine besondere Eigenschaft des Potentials, und das Potential existiert nur im zeitunabhängigen Fall. *Damit ist die Wegunabhängigkeit der Spannung ebenfalls nur im zeitunabhängigen Fall gegeben. Im Fall zeitabhängiger Phänomene ist die „Spannung“ wegabhängig.* Als ich mir diese Tatsache bewusst gemacht habe, wurde mir vieles klarer. Es fiel mir sozusagen wie „Schuppen von den Augen“. Mit Hilfe dieser Erkenntnis ist die Anzeige zweier unterschiedlicher Spannungswerte der Voltmeter nämlich überhaupt nicht mehr verwunderlich. Da die „Spannung“ bzw. das Linienintegral über die Feldstärke in diesem Fall nicht mehr wegunabhängig ist, scheint es natürlich durchaus möglich zu sein, dass über den Weg des linken Widerstandes ein anderer Wert gemessen wird als über den Weg des rechten Widerstandes. Im zeitabhängigen Fall muss demnach mit dem Spannungsbegriff mit großer Vorsicht umgegangen werden, da bestimmte Eigenschaften entweder nicht oder nur eingeschränkt gültig sind. Mein Vorschlag zum Schluss dieses Kapitels bezüglich des Umgangs mit dem Spannungsbegriff ist daher (siehe auch [7]): Bei zeitabhängigen Phänomenen bzw. Anwesenheit von Induktion sollte:

1. aufgrund der Wegabhängigkeit der Begriff des Potentials vermieden werden,
2. nicht von einem Spannungsabfall zwischen zwei Punkten gesprochen werden, da der Spannungsbegriff nicht nur von der Lage dieser Punkte abhängig ist,
3. stattdessen von einer „Spannung entlang eines Weges“ oder „über einen Widerstand“ gesprochen werden.

5.2.3. Spannungsmessung bei Anwesenheit von Induktion

Mit Hilfe dieser Kenntnisse kann man verstehen, warum beide Voltmeter unterschiedliche Messwerte anzeigen und von welchen Randbedingungen diese abhängen. Wir betrachten die Schaltung in Abbildung 5.4, die von einem zeitlich veränderlichen magnetischen Feld durchsetzt ist. Wir bezeichnen die beiden äußeren Maschen, in denen sich die Voltmeter befinden, von nun an als „Messkreise“ und die mittlere Masche als „Induktionsstromkreis“. Wir gehen im Moment noch in einer Vereinfachung davon aus, dass in den beiden Messkreisen kein Strom induziert wird, da sich das Magnetfeld nur auf den mittleren Induktionsstromkreis beschränken soll. Gleichung (5.5) lautet dann entlang des geschlossenen Induktionsstromkreises mit Umlaufsinn gegen den Uhrzeigersinn:

$$\int_{A,R_1}^B \vec{E} \cdot d\vec{r} + \int_{B,R_2}^A \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\dot{\Phi} \quad (5.6)$$

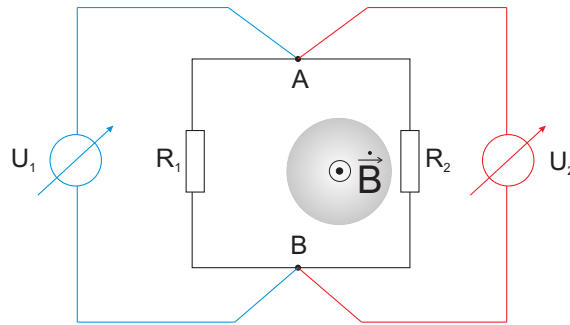


Abbildung 5.4.: Die Anordnung wird nun in der mittleren Masche von einem zeitabhängigen magnetischen Fluss durchsetzt. Der Flächennormalvektor \vec{n} , sowie die zeitliche Änderung des Flussdichtevektors \vec{B} zeigen aus der Zeichenebene heraus.

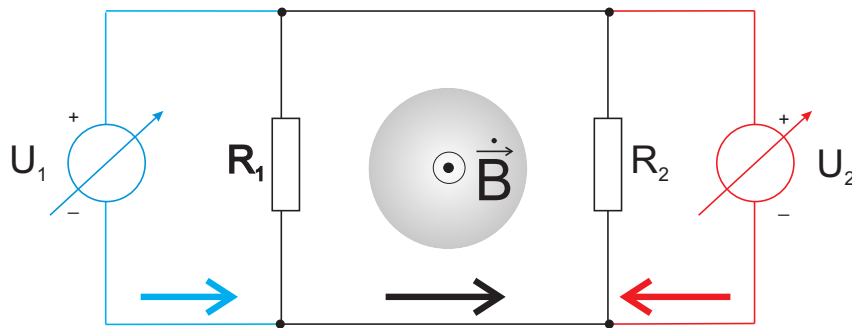


Abbildung 5.5.: Die Anordnung wird etwas vereinfacht dargestellt. Da die Leitungen keinen Widerstand besitzen, sind die beiden Darstellungen in Abb. 5.4 und 5.5 identisch. Der Richtungssinn der Maschen ist durch farbige Pfeile gekennzeichnet.

Dabei besteht die linke Seite der Gleichung aus zwei Beiträgen, nämlich dem Wegintegral von A nach B über den Widerstand R_1 und dem Wegintegral von B nach A über den Widerstand R_2 . Unter der Voraussetzung, dass die Kabel keinen Widerstand besitzen, ist das im Kreis induzierte elektrische Feld nur in den Widerständen von null verschieden. Wir sprechen daher in diesem Fall von der „Spannung über einem Widerstand“. Da für diese Widerstände das Ohm'sche Gesetz gültig ist, können wir Gleichung (5.6) durch Einführen der induzierten Stromstärke umschreiben.

$$R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = -\dot{\Phi} \quad (5.7)$$

Nun legen wir entsprechend Abbildung 5.5 einen Umlaufsinn gegen den Uhrzeigersinn in der mittleren Masche fest. Diese Festlegung ist prinzipiell völlig willkürlich. Sie muss jedoch einmal festgelegt und danach konsequent eingehalten werden, damit den Größen Spannung und Stromstärke ein Vorzeichen zugeordnet werden kann⁴. In den beiden äußeren Messkreisen gilt $\dot{\Phi} = 0$, und somit wird in diesen Kreisen auch kein Strom induziert.

⁴Ausführlichere Informationen und Darstellungen von Bezugspfeilen und Umlaufsinn in elektrischen Kreisen findet man in Anhang A.1.

$$U_1 - R_1 \cdot I = 0 \quad (5.8)$$

$$U_2 + R_2 \cdot I = 0 \quad (5.9)$$

Durch Einsetzen von (5.7) in (5.8), und (5.9) erhalten wir Beziehungen für die Messwerte der Voltmeter U_1 und U_2 .

$$U_1 = -R_1 \frac{\dot{\Phi}}{R_1 + R_2} \quad (5.10)$$

$$U_2 = R_2 \frac{\dot{\Phi}}{R_1 + R_2} \quad (5.11)$$

Die Messwerte haben offensichtlich unterschiedliche Vorzeichen. In unserer experimentellen Anordnung bleibt dieser Sachverhalt zunächst unbeobachtbar. Da im mittleren Induktionsstromkreis ein Wechselstrom induziert wird, sind die gemessenen Größen „Wechselspannungen“, deren Effektivwerte gemessen werden. Dabei geht das negative Vorzeichen von U_1 verloren. Darüber hinaus erkennt man, dass die Spannungswerte ausschließlich von Eigenschaften des mittleren Induktionsstromkreises abhängig sind $U = U(R_1, R_2, \dot{\Phi})$. Die Voltmeter messen daher wirklich nur Eigenschaften des mittleren Kreises. Addiert man die Gleichungen (5.10) und (5.11), indem man die äußerste Masche durchläuft, so erhält man $U_1 + (-U_2) = -\dot{\Phi}$. Werden die beiden Messkreise nicht mehr als flussfrei vorausgesetzt, so tauchen in den oberen Gleichungen zusätzlich die magnetischen Flüsse Φ_1 und Φ_2 durch die Messkreise auf.

$$U_1 = -\dot{\Phi}_1 - R_1 \frac{\dot{\Phi}}{R_1 + R_2} \quad (5.12)$$

$$U_2 = -\dot{\Phi}_2 + R_2 \frac{\dot{\Phi}}{R_1 + R_2} \quad (5.13)$$

Die Größen Φ_1 und Φ_2 hängen maßgeblich von den Führungen der Anschlusskabel der Voltmeter ab. Aus diesem Grund erhält man in diesem Fall kaum reproduzierbare Messwerte, da die Messwerte nun keine reine Eigenschaft des Stromkreises mehr darstellen. Man kann aber den magnetischen Fluss innerhalb eines Messkreises systematisch erhöhen, indem man ein Kabel über den mittleren Kreis hält und mit dem Kabel mehrere Schleifen bildet. Mit jeder neu hinzukommenden Schleife vergrößert sich $\dot{\Phi}$ in diesem Messkreis um einen bestimmten Beitrag, was sich am entsprechenden Voltmeter durch eine stufenartige Vergrößerung der Spannung bemerkbar macht. Wir fassen zusammen:

- Wenn die beiden Messkreise frei von zeitabhängigen, magnetischen Flüssen sind, so sind die gemessenen Spannungen über den Widerständen U_1, U_2 nur durch den mittleren Induktionsstromkreis bestimmt.
- Der Induktionsstromkreis kann als Reihenschaltung zweier Widerstände R_1, R_2 interpretiert werden.
- Im Induktionskreis werden ein elektrisches Feld und ein elektrischer Strom induziert.

5.3. Eigene Experimente zur Prüfung der Theorie

Nachdem nun eine Vorstellung über die Ursache der unterschiedlichen Messwerte und deren Beziehungen zueinander gewonnen wurde, sollen diese experimentell verifiziert werden, indem bestimmte Vorhersagen an das Experiment, die aus dieser Theorie folgen, geprüft werden sollen.

5.3.1. Flussfreie Messkreise im Experiment

Zunächst wurde an vielen Stellen bereits vorausgesetzt, dass die Messkreise magnetisch flussfrei sein müssen. Wie kann man diese Situation in der Realität herstellen? Aufgrund von Streufeldern ist es kaum möglich dafür zu sorgen, dass die Messkreise feldfrei sind. Allerdings kann man den magnetischen Fluss minimieren. Da dieser das Produkt aus Magnetfeldstärke und der vom Feld durchsetzten Fläche ist, reicht es die Fläche zu minimieren, wodurch der magnetische Fluss minimal und im Idealfall gleich null wird. In Abbildung 5.6 wird dies skizzenhaft dargestellt.

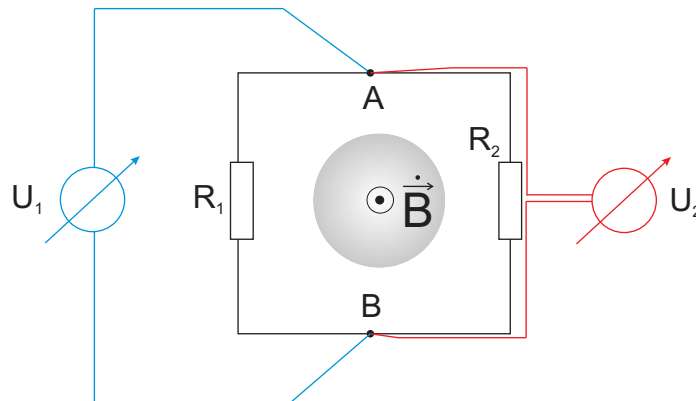


Abbildung 5.6.: Durch geschickte Verlegung der Messkabel am Rand des Kreises lässt sich im Experiment erreichen, dass der Messkreis magnetisch flussfrei ist.

Die Messkabel des rechten Messgerätes U_2 wurden sehr nahe am Induktionsstromkreis entlang verlegt und befinden sich im weiteren Verlauf sehr nahe beieinander. Dadurch ist die Fläche des Messkreises praktisch gleich null. Eine solche Verlegung der Messkabel führt also dazu, dass keine zusätzlichen Ströme in den Messkreisen induziert werden können. Die besten Ergebnisse erzielt man dadurch, dass man die Kabel im weiteren Verlauf verdreht (vgl. Abb. 5.1 und 5.2).

5.3.2. Verschiebung der Abgriffpunkte

Welche Vorhersagen macht die Theorie, wenn die Messgeräte an beliebigen Punkten in der Schaltung angeschlossen werden?

Zunächst soll davon ausgegangen werden, dass die Messkreise frei von magnetischen Flüssen sind. Die Messkabel wurden wie in Abbildung 5.6 beim rechten Messgerät dargestellt verlegt. Im Induktionsskreis befinden sich zwei Widerstände. Die Leitungen in diesem Kreis haben praktisch keinen messbaren Widerstand. Daher ist auch das elektrische Feld in diesem Induktionsstromkreis nur über den Widerständen von null verschieden. Somit sollte eine Verschiebung des Punktes B in Abbildung 5.7 links zu keiner Änderung in den Messergebnissen führen, so lange keiner der beiden Widerstände dabei übersprungen wird. In Experiment lässt sich dies sehr

einfach überprüfen, indem die Messkabel an verschiedene Stellen im Stromkreis angeschlossen werden.

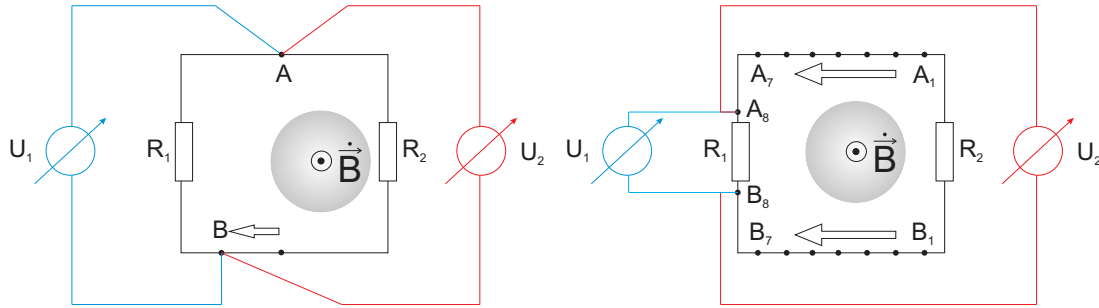


Abbildung 5.7.: **Links:** Was ändert sich an der Anzeige der Voltmeter, wenn ein Abgriffpunkt innerhalb des Kreises verschoben wird?

Rechts: Eine Variation der Abgriffpunkte hat keinen Einfluss auf die beiden Messwerte U_1, U_2 , so lange keiner der Widerstände dabei übersprungen wird. Die Messkreise werden als flussfrei vorausgesetzt $\Phi_1 = \Phi_2 = 0$.

5.3.3. Systematische Änderung des magnetischen Flusses im Messkreis

Ein weiteres Experiment von mir, um die Theorie weiterhin auf Konsistenz zu prüfen, bestand darin, den magnetischen Fluss durch einen Messkreis systematisch zu verändern. Das Steckbrett wird durch eine quadratische Leiterschleife mit einer Kantenlänge h aus Silberdraht ersetzt, in die die Widerstände eingelötet wurden. Dadurch ist man bei der Wahl der Abgriffpunkte nicht mehr auf die wenigen Kontakte im Steckbrett angewiesen, sondern es sind erheblich feinere Einstellungen möglich. Die Leiterschleife wird von einem homogenen Magnetfeld vollständig durchsetzt (Abb. 5.8). Dies wurde realisiert, indem zwischen Magnetfeldspule und Schleife eine Eisenplatte mit etwa der gleichen Größe wie die Leiterschleife gelegt wurde.

Die Kontakte A, B des Voltmeters sind gleichermaßen auf der Längsseite x der Schleife verschiebbar. Der gesamte magnetische Fluss wird somit in zwei Teile Φ_1, Φ_2 geteilt, deren Größe jetzt ortsabhängig ist. Die linke der beiden Maschen betrachten wir als Messkreis, der nun von $\Phi_1(x)$ durchflutet wird. Wir fragen nun nach der Abhängigkeit der Messspannung U_1 von der Verschiebung x . Dabei kann sowohl die linke, als auch die rechte Masche betrachtet werden. Es gelten analoge Gleichungen zu (5.8) und (5.9), wobei die hier zusätzlich auftretenden magnetischen Flüsse von der Koordinate x abhängig sind.

$$U - R_1 \cdot I = -\dot{\Phi}_1 \quad (5.14)$$

$$U + R_2 \cdot I = -\dot{\Phi}_2 \quad (5.15)$$

Bei einer Breite h der Leiterschleife gilt $\Phi(x) = Bhx$ und somit folgt:

$$U = -R_1 \frac{\dot{\Phi}}{R_1 + R_2} + \dot{B}hx \quad (5.16)$$

$$U = R_2 \frac{\dot{\Phi}}{R_1 + R_2} + \dot{B}h(h - x) \quad (5.17)$$

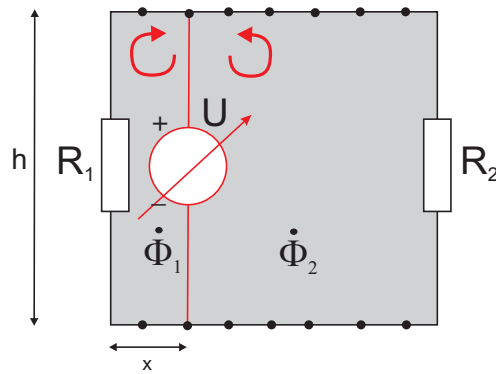


Abbildung 5.8.: Eine Variante des Versuchs mit einem nicht verschwindenden magnetischen Fluss im Messkreis.

Gleichung (5.16) stellt eine lineare Funktion mit der Steigung $\dot{B}h$ dar. Dies wurde mit Hilfe eines Aufbaus nach Abb. 5.8. mit einer Leiterschleife aus Silberdraht gemacht. Tatsächlich liegen die Messwerte sehr gut auf einer Geraden (Abb. 5.9).

5.3.4. Abschätzung der effektiven magnetischen Flussdichte

Aus der Steigung in Abbildung 5.9 lässt sich über einen kleinen Umweg auf die magnetische Flussdichte B schließen. Die Steigung im Diagramm m ist proportional zum Scheitelwert von \dot{B} . Daher erhalten wir aus den Messwerten eine Abschätzung für \dot{B} . Die Voltmeter messen Effektivwerte und daher gilt nach (5.16):

$$U_{eff} = C + hx\dot{B}_{eff}.$$

Somit folgt mit $\dot{B} = \omega B$ für die Steigung m aus dem Diagramm in Abbildung 5.9

$$m = h\omega B_{eff},$$

und die effektive magnetische Flussdichte wird bestimmbar:

$$B_{eff} = \frac{m}{h\omega} \quad (5.18)$$

Es ergibt sich nach meinen Daten ein Wert für die Feldstärke von $B_{eff}^{theo} = 2,75mT$. Das Resultat liegt (zumindest) in der gleichen Größenordnung, wie der nachträglich mit einer Hall-Sonde (UNILAB 612.003) gemessene Wert $B_{eff}^{mess} = 2,47mT$.

5.4. Erfahrungen mit Studierenden und ausgebildeten Lehrern

Ich habe dieses Phänomen mit einigen Lehramtsstudenten der Sekundarstufe 2 im Rahmen eines Seminars im Hauptstudium und im Rahmen einiger Nachmittagsveranstaltungen mit

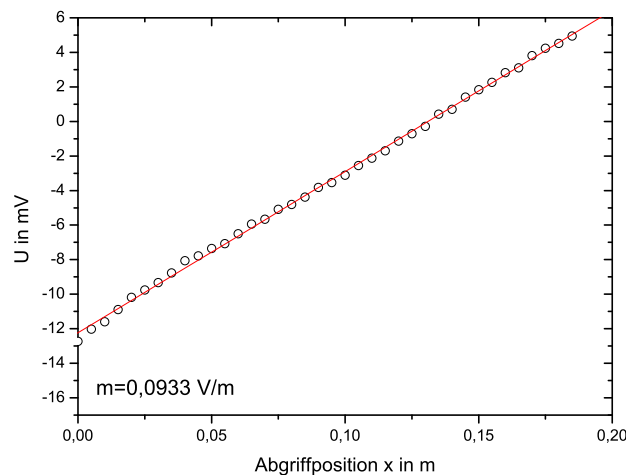


Abbildung 5.9.: Messung der Spannung U als Funktion des Abgriffpunktes x für einen inhomogenen Ring $R_1 = 680\Omega$ und $R_2 = 330\Omega$.

ausgebildeten Lehrern, die bereits lange Jahre in der Schule unterrichten, erprobt. Dabei zeigt sich unter anderem sehr deutlich, dass der Spannungsbegriff bei den Studierenden, die praktisch am Ende ihrer universitären Ausbildung stehen, aber auch bei den ausgebildeten Lehrern immer noch mit vielen Schwierigkeiten verbunden ist. Der Lehrende muss sich beim Einsatz dieses Ausgangsphänomens über einige dieser Fehlvorstellungen bewusst sein. Dazu gehören vor allem die Unterscheidung des Spannungsbegriffs im Falle zeitunabhängiger und zeitabhängiger Felder (Kapitel A.2).

Ich stellte den Teilnehmern das Phänomen wie in Abbildung 5.2 gezeigt vor. Da der Aufbau sehr übersichtlich und durchschaubar ist, habe ich es vermieden, viele Worte der Einführung zu verlieren. Vielmehr präsentierte sich das Phänomen den Teilnehmern nach dem Einschalten der Geräte selbst. Das Phänomen unterschiedlicher Anzeigewerte der Voltmeter stellte für alle Teilnehmer sofort eine erklärungsbedürftige Situation dar. Erste Überlegungen führten sofort auf die gleichen Fragestellungen, die ich mir zu Beginn meiner Untersuchungen stellte.

1. Warum sind überhaupt Spannungen messbar?
2. Warum sind unterschiedliche Spannungswerte messbar?

Manchen Teilnehmern fällt es am Ende relativ leicht, eine Antwort auf die erste Frage zu geben (...Es wird durch die Spule eine (Induktions-) Spannung im Kreis induziert, die zu einem Spannungsabfall führt...). Auf die zweite Frage hingegen fällt eine Antwort schwer, was natürlich überhaupt nicht verwunderlich ist. Interessant ist jedoch, welche Hypothesen und Erklärungsansätze von den Teilnehmern vorgeschlagen wurden.

5.4.1. Das Problem mit den Kabelführungen

Eine ganz typische Schlussfolgerung der Seminarteilnehmer in Bezug auf die unterschiedlichen Spannungswerte ist die Folgende:

Studierende:

Da die Voltmeter identisch sind [...], kann die Spannungsdifferenz nicht durch die Messgeräte selbst entstehen. Außerdem können wir ausschließen, dass tatsächlich zwei verschiedene Spannungen an den Messpunkten anliegen, da die Spannung die Potentialdifferenz dieser beiden Punkte ist und somit nur einen Wert zulässt. Der Grund für das Phänomen ist vermutlich die Spannungsmessung.

Es wird hierbei davon ausgegangen, dass die unterschiedlichen Anzeigewerte auf messtechnische Ursachen zurückzuführen sind. Eine grundsätzliche Problematik im Zusammenhang mit der Spannungsdefinition wird nicht vermutet. Dies ist aber auch kaum zu erwarten, da es zumindest bei ersten qualitativen Untersuchungen sehr naheliegend erscheint, dass Effekte der Messapparatur hier eine große Rolle spielen. Es wäre ein zu großer Schritt die Art der Definition in Frage zu stellen. Außerdem zeigte sich beim Einsatz des Phänomens bei der Gruppe von ausgebildeten Lehrern, dass auch diese am Spannungsbegriff in Bezug auf das Potential festhalten.

Die Seminarteilnehmer untersuchten nun die Messapparatur etwas genauer, indem sie sich auf den Verlauf der Anschlusskabel der Voltmeter konzentrierten. Obwohl es beim Bewegen der Messkabel sehr schwierig ist, reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, kamen sie doch zumindest zu halbquantitativen Aussagen. Bei verschiedenen Führungen⁵ der Kabel wurden die Anzeigewerte der Voltmeter protokolliert. Dabei stellte sich heraus, dass der Anzeigewert des einen Messgeräts in allen Fällen größer war als der des anderen. Aufgrund dieser Tatsache schlossen sie zunächst induktiv, dass dies eine grundsätzliche Eigenschaft der Schaltung sein müsse. Es wurden von den Studierenden folgende Hypothesen aufgestellt.

H1: In der Schaltung gilt: $U_1 < U_2$ falls $R_1 < R_2$

H2: Falls die Widerstände gleich sind, so sind auch die Spannungen identisch:
 $U_1 = U_2$ falls $R_1 = R_2$.

Diese Hypothesen sollten daraufhin experimentell überprüft werden. Bei festen Positionen der Messkabel wurden Widerstände verschiedener Größe in die Schaltung integriert und die zugehörigen Spannungen gemessen. Beim Vertauschen der Widerstände vertauschen sich auch die Messwerte. Dadurch konnten (zumindest für die verwendeten Widerstände) die beiden Hypothesen H1 und H2 experimentell bestätigt werden. Eine der teilnehmenden Gruppen nannte explizit den Zusammenhang:

Studierende:

Für verschiedene Widerstände werden die Teilspannungen gemessen. Die „Gesamtspannung“ ergibt sich aus der Summe der „Teilspannungen“. Es gilt:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (5.19)$$

Die Vorgehensweise der Lehrer verlief in der Anfangsphase recht ähnlich. Nachdem sich zeigte, dass die Anzeigewerte der Voltmeter sehr deutlich von der Lage der Messkabel abhängen, wurde

⁵Die Teilnehmer sprechen von einer Führung nach rechts, nach oben oder nach vorne.

im Laufe der Untersuchungen ein Messkabel aus dem Steckbrett gezogen. Dabei wurden folgende Beobachtungen gemacht.

1. Wird aus dem Versuchsaufbau ein Messkabel gezogen, zeigt das damit verbundene Voltmeter eine Spannung im mV Bereich an.
2. Werden beide Messkabel eines Voltmeters aus der Schaltung gezogen, so zeigt das Voltmeter eine Spannung im mV Bereich an.
3. Das Voltmeter zeigt bereits eine Spannung an, wenn ein einzelnes Messkabel in einer Anschlussbuchse des Messgerätes steckt.

Daraus ergab sich die Frage, was in diesem Fall von diesem Voltmeter gemessen wird. Als Ursache der angezeigten Spannungswerte wurde das Netzgerät genannt, da die Messwerte vom Abstand zwischen Voltmeter und dem Netzgerät abhängig sind. Dennoch sorgte dieser Sachverhalt für große Unsicherheit, aus der eine Reihe von Diskussionen resultierten. Die wesentlichen Erkenntnisse, die sich aus den Untersuchungen der Studierenden und der Lehrer ergaben, waren:

1. Der Anzeigewert eines Messgerätes ist nur dann vertrauenswürdig, wenn beide Messkabel angeschlossen sind.
2. Der Anzeigewert der Voltmeter ist umso größer, je größer der Widerstand ist, über dem die Spannung gemessen wird.
3. Der Messwert wird aber zusätzlich von äußeren Einflüssen überlagert, die von der Lage der Messkabel abhängen.

5.4.2. Stromstärkemessungen

Um schließlich Eigenschaften des Messkreises untersuchen zu können, ersetzte eine Gruppe von Studierenden die beiden Widerstände durch zwei (Digital-) Amperemeter. Für die Stromstärke ergab sich $I_1 = I_2 = 0,93mA$. Im Messkreis fließt demnach ein Kreisstrom. Danach sollten ebenfalls die Ströme in den Messkreisen gemessen werden, was sich als problematisch herausstellte, da die dort fließenden Ströme aufgrund der hohen Innenwiderstände der Voltmeter zu klein waren. Es wurden nun folgende Schlussfolgerungen gezogen:

Studierende:

Im Messkreis fließt zunächst ein Strom. Da die Voltmeter eine Spannung anzeigen, muss in den Messkreisen ebenfalls ein Strom fließen (auch wenn wir diesen nicht messen konnten). Dieser Strom in den Messkreisen wird durch das Magnetfeld beeinflusst (Kabelführungen).

Aus diesem Grund führte die Gruppe eine Spannungsmessung mit abgeschirmten Kabeln durch, die zusätzlich nach oben hin abgeleitet wurden, damit diese möglichst parallel zu den Feldlinien verlaufen. Dabei wurden nur die inneren Seelen der Kabel als Leiter benutzt. Es ergaben sich in der Tat weitgehend von den Kabelführungen unabhängige, und damit reproduzierbare Ergebnisse. Allerdings würde ich diese eher auf die geschickte Kabelführung nach oben zurückführen (denn dadurch wurde die aufgespannte Fläche der Kabel deutlich kleiner) und nicht auf die abschirmende Wirkung des Messkabels, da die abschirmende Wirkung nur bei elektrischen Feldern wirksam ist. Somit ergaben sich weitere Erkenntnisse:

4. Die gemessenen Spannungen sind aufgrund des äußeren Magnetfeldes von der Lage der Messkabel abhängig. In ihnen wird ein vom Magnetfeld abhängiger Strom induziert.
5. Dieser Umstand kann durch abgeschirmte Kabel und/oder entsprechend günstige Kabelführungen minimiert werden.

5.4.3. Die Spannungsteilerhypothese von Studierenden

Nachdem eine Vorstellung über die Rolle der Messkabel in der vorliegenden Versuchsanordnung gewonnen wurde, sollte nun eine genauere Vorstellung über die Entstehung der Spannungen gewonnen werden. Man war sich bewusst, dass die Messgeräte eine Eigenschaft des Stromkreises messen, die von äußeren Einflüssen überlagert wird. Da man diese äußeren Einflüsse nicht eliminieren konnte, sollten sie zumindest durch eine kontrollierte, feste Verlegung der Messkabel konstant gehalten werden. Dabei zeigte sich, dass eine Verschiebung der Abgriffpunkte keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Die Seminarteilnehmer schlussfolgerten daraus, dass die Schaltung auch als eine „Reihenschaltung“ von Widerständen interpretiert werden kann. In dieser Spannungsteilerschaltung gilt:

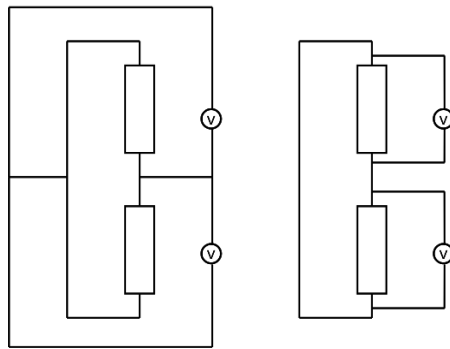


Abbildung 5.10.: Änderung der Schaltungsdarstellung durch Verschiebung der Voltmeteranschlussstellen. Die Anzeigewerte der Messgeräte bleiben dadurch unverändert.

$$U_{Ges} = U_1 + U_2 = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I \quad (5.20)$$

und man erhält für die Teilspannungen U_1 und U_2 :

$$U_1 = U_{Ges} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.21)$$

$$U_2 = U_{Ges} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.22)$$

Dabei ist zunächst noch ungeklärt, welche Rolle dabei die Gesamtspannung U_{Ges} spielt. Die Gesamtspannung U_{Ges} ist gleich der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses⁶. Offensichtlich lässt sich die Schaltung tatsächlich im gewissen Rahmen als „Spannungsteilerschaltung“ interpretieren. Allerdings war es der Gruppe nicht möglich, die Gesamtspannung U_{Ges} zu interpretieren. Folgende Fragen blieben offen:

⁶Dieser Zusammenhang wurde von den Studierenden nicht hergestellt.

1. Wo fällt die Gesamtspannung U_{Ges} ab?
2. Wie kann man die Gesamtspannung U_{Ges} messen?

5.4.4. Bestimmung der induzierten Spannung

Eine andere Gruppe von Studierenden ging einen Schritt weiter und versuchte, einen Zusammenhang zwischen U_{Ges} und der gesamten im Kreis induzierten Spannung herzustellen.

Studierende:

Die Summe der beiden Spannungen über den Widerständen $U_1 + U_2$ muss gleich der im gesamten Kreis induzierten Spannung sein. Diese ist gegeben durch:

$$U_{Ges} = U_1 + U_2 = U_{ind} = -\frac{dB}{dt} \cdot A \quad (5.23)$$

Die aufgespannte Fläche der Leiterschleife betrug $A = 0,03m^2$, und das Magnetfeld wurde mit einer Hall-Sonde gemessen $B = 5,8mT$. Die zeitliche Änderung des Magnetfeldes wurde nun durch eine Näherung bestimmt. Da es sich um eine sinusförmige Änderung des Magnetfeldes handelt, nimmt das Magnetfeld in der Zeit $0 \leq t \leq T/4$ zu. In diesem Zeitintervall wird die Zunahme des Magnetfeldes näherungsweise als linear betrachtet $dB/dt = \Delta B/\Delta t$. Daher gilt

$$U_{ind} = A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = 0,03m^2 \cdot \frac{5,8mT}{0,005s} \quad (5.24)$$

Daraus ergibt sich eine Induktionsspannung von $U_{ind} = 35mV$. Diese Näherung ist zulässig, da sich das Ergebnis nur unwesentlich vom korrekt berechneten unterscheidet. Leider weicht der berechnete Wert $U_{ind} = 35mV$ sehr stark vom Messwert der Gruppe ab $U_{ind}^{mess} = 9mV$. Dies fiel der Gruppe aber nicht auf, da sie bei ihrer Berechnung des theoretischen Wertes einen Fehler machte. Sie setzten einen falschen Wert für die Zeit an (1/50 statt 1/200 Sekunden). Dadurch ergab sich ein falscher Wert von $9mV$, der aber hervorragend zu ihrem Messwert passte. Der Messwert ist demnach viel zu klein. Tatsächlich wird hier vermutlich noch zusätzlich der Einfluss von Induktion in den Messkabeln eine Rolle gespielt haben.

5.4.5. Variation der Leiterschleifenfläche

Eine weiteres, wichtiges Untersuchungsfeld bei diesem Phänomen ist die Abhängigkeit der gemessenen Spannungen von der vom Magnetfeld durchsetzten Fläche der Leiterschleife. Sowohl den Studierenden, als auch den Lehrern war bewusst, dass diese Fläche eine wesentliche Größe des Induktionsgesetzes darstellt. Was ändert sich an den Messwerten der Voltmeter, wenn die Leiterschleifenfläche verkleinert oder verschoben wird? Mit Hilfe unserer bisherigen Erkenntnisse sind wir in der Lage, Vorhersagen zu machen:

Der Messwert der Voltmeter ist (bis auf ein Vorzeichen) bei homogenem Feld gleich der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses und dieser ist proportional zu der vom Magnetfeld durchsetzten Fläche. Im einfachsten Fall entspricht diese der Fläche der Leiterschleife- und zwar genau dann, wenn das Magnetfeld die Leiterschleife homogen durchsetzt. Darüber hinaus stellt sich die Frage, inwieweit die Homogenität bzw. die Inhomogenität des Magnetfeldes eine Rolle spielt. Es müssen daher folgende Fragen geklärt werden:

1. Welche Gestalt hat das Magnetfeld im vorliegenden Versuch? Wie groß ist die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche?
2. Welchen Einfluss hat die Homogenität bzw. die Inhomogenität des Feldes auf die Messwerte der Voltmeter?

In der Spule, die das Magnetfeld erzeugt, befindet sich ein Eisenkern mit quadratischem Querschnitt. Durch das Einsetzen des Kerns vergrößert sich die magnetische Flussdichte in der Spule. Näherungsweise kann man sich vorstellen, dass die magnetische Flussdichte nur im Innern des Kerns von Null verschieden ist. Es gibt demnach praktisch keine Streufelder. In diesem Fall beschränkt sich die von dem Magnetfeld durchsetzte Fläche auf den Querschnitt des Eisenkerns. Die für die Induktionsspannung relevante Fläche ist demnach deutlich kleiner als die Fläche der Leiterschleife. Es ist daher zu erwarten, dass sowohl eine Verkleinerung, als auch eine Verschiebung der Leiterschleife zu keiner Änderung der Messwerte führen wird. Dies gilt, so lange die Fläche der Leiterschleife größer als die Querschnittsfläche des Eisenkerns ist. Im Experiment zeigt sich, dass die Messwerte weitgehend unabhängig von der Position der Leiterschleife über dem Eisenkern sind, so lange die Leiterschleife den Kern vollständig umschließt. Bewegt man den Eisenkern sehr nahe an den Rand der Leiterschleife, so beobachtet man eine leichte Spannungsänderung, da in diesem Bereich die Streufelder um den Kern herum von Bedeutung sind. Es spielt keine Rolle, ob das Magnetfeld innerhalb der Leiterschleife homogen ist oder nicht (Das Induktionsgesetz macht darüber keine Aussage.). Füllt das Magnetfeld die Fläche der Leiterschleife vollständig homogen aus⁷, so können Zusammenhänge zwischen der wirksamen Fläche und den induzierten Spannungen untersucht werden (vgl. Kapitel 5.3.3). Somit können die oben genannten Fragen folgendermaßen beantwortet werden:

1. Die magnetische Flussdichte ist in guter Näherung nur innerhalb des Eisenkerns von Null verschieden. Daher beschränkt sich die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche auf die Querschnittsfläche des Eisenkerns.
2. Die Inhomogenität des Feldes spielt nur dann eine Rolle, wenn die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche in etwa gleich der Leiterschleifenfläche ist und Abhängigkeiten zwischen Fläche und Induktionsspannung untersucht werden.

Es zeigt sich bei meinen Beobachtungen, dass sowohl die Studierende als auch die Lehrer einen Zusammenhang zwischen den gemessenen Spannungen und der wirksamen Fläche erkennen. Als deutlich schwieriger erweist es sich dagegen, diese Fläche(n) genau zu lokalisieren. Insbesondere die Lehrer hatten damit Schwierigkeiten, da sie mehrere Flächen identifizierten. Die Leiterschleife spannt eine Fläche auf, und die Messkreise spannen Flächen auf. Welche Bedeutung haben diese Flächen, und welche davon sind in welchen Fällen relevant? Hinzu kommt, dass die Untersuchung der Zusammenhänge dadurch erschwert wird, dass eine Größenänderung der Leiterschleife in der Regel im Experiment tatsächlich zu variierenden Messergebnissen führt. Die Ursache liegt darin begründet, dass aufgrund ungünstiger Kabelführungen die Messkreise nicht frei von magnetischen Flüssen sind. Da der Aufbau beim Verändern der Leiterschleife bewegt werden muss, können so Spannungsdifferenzen auftreten, die jedoch ausschließlich auf magnetische Flussänderungen in den Messkreisen zurückzuführen sind bzw. darauf, dass obige

⁷Mit Hilfe einer großen Eisenplatte die zwischen Kern und Leiterschleife gelegt wird, lässt sich dies experimentell erreichen.

Aussagen nur Näherungen sind.

Somit zeigt sich an diesem Beispiel, dass die Isolierung von physikalischen Phänomenen auch bei den erfahrenen Lehrern für Schwierigkeiten sorgen kann. Aus diesem Grund sollte man sich als Lehrender stets über den hohen Anspruch bewusst sein, der damit verbunden sein kann.

5.4.6. Woher „weiß“ das Voltmeter, über welchen Widerstand es zu messen hat?

Eine interessante Frage, die eine Gruppe von Studierenden im Laufe ihrer Untersuchungen beschäftigte und auf die ich zum ersten Mal durch Pelster [63] aufmerksam wurde, war die Folgende⁸:

Angenommen es befinde sich nur ein Voltmeter in der Schaltung⁹ (z.B. nur das linke vgl. Abb. 5.11). Dieses Voltmeter misst sozusagen die Spannung längst des Weges über R_1 . Nun wird das Voltmeter über die Schaltung hinweg gehoben und auf die andere Seite gestellt - dorthin, wo sich in Abb. 5.4 das rechte Voltmeter U_2 befand. Die Frage ist nun, welcher Wert in diesem Fall vom Voltmeter gemessen wird. Nach unseren bisherigen Überlegungen und Experimenten müsste nun der Wert U_2 gemessen werden, da das Voltmeter die Spannung längst des Weges R_2 misst, was sich auch im Experiment bestätigt. Aber woher „weiß“ das Voltmeter, dass es nun über den Widerstand R_2 messen muss?

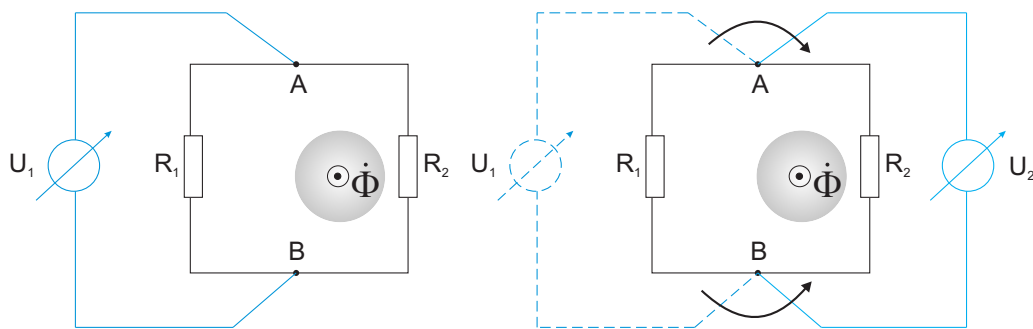


Abbildung 5.11.: Ändert man die Position eines Voltmeters von der linken Seite der Schaltung auf die rechte Seite, so verändert sich auch der gemessene Spannungswert entsprechend.

Betrachten wir die Maschen in Abbildung 5.5 (wir denken uns das rechte Voltmeter weg).

Da $U_1 = \tilde{U}_1$ der vom dem Voltmeter angezeigte Messwert ist, muss gelten:

$$R_1 \cdot I = -\dot{\Phi} - R_2 \cdot I$$

oder

$$(R_1 + R_2) \cdot I = -\dot{\Phi}$$

⁸Es war zu diesem Zeitpunkt auch bei den Teilnehmern bereits verstanden, dass man den Induktionskreis als eine „Reihenschaltung“ auffassen kann. Somit war klar, warum unterschiedliche Spannungen an den Widerständen gemessen werden.

⁹Die Messkreise werden als magnetisch flussfrei vorausgesetzt.

Dies entspricht Gleichung 5.7. Das bedeutet, dass obwohl das Voltmeter gleichzeitig über beide Widerstände misst, sich dennoch identische Messwerte für U_1 ergeben. Das liegt daran, dass in der größeren Masche zusätzlich ein magnetischer Fluss enthalten ist, der dafür sorgt, dass U_2 nicht alleine, sondern mit $-\dot{\Phi}$ überlagert gemessen wird. Diese Überlagerung führt sozusagen zum gleichem Messwert U_1 .

Die Aussage: „Das Voltmeter misst entlang des Weges über den Widerstand R “ setzt voraus, dass der Messkreis frei von zeitabhängigen magnetischen Flüssen ist. Dies ist nur für die Masche U_1, R_1 erfüllt, und nicht für die Masche U_1, R_2 . Daher misst das Voltmeter die Spannung entlang des Widerstandes R_1 .

5.4.7. Erklärungsversuche

Am Schluss stand bei den Seminarteilnehmern eine Reflexionsphase, in der ihre gewonnenen Erkenntnisse gedeutet wurden. Das Problem der Nichtreproduzierbarkeit der Messergebnisse aufgrund der Kabelführungen wurde als störendes, messtechnisches Problem aufgefasst.

Studierende:

Außerdem ist es sehr schwer, den Aufbau bei mehreren Messungen identisch aufzubauen, da sich allein durch Ungenauigkeiten bei den Kabelführungen, Position des Steckbretts über der Spule unendlich viele verschiedene Möglichkeiten ergaben.

Es entstand daher zunächst eine Auflistung bekannter Fakten. Danach wurden Erklärungsversuche gemacht.

Studierende:

Zunächst haben wir eine Leiterschleife, durch deren Mitte ein wechselndes Magnetfeld fließt und in die zwei Widerstände eingebaut sind. Der induzierte Strom ist in allen Punkten der Leiterschleife gleich groß. [...] Nun wird ein Voltmeter U_1 eingebaut. Dieses zeigt eine Spannung an, da es den Strom misst, der durch das Voltmeter fließt. Dieser Strom ist normalerweise proportional zu der anliegenden Spannung. [...] In unserem Fall wird aber auch ein Strom im Messkreis induziert, der sich mit dem Strom der durch das Voltmeter fließt, überlagert.

Interessant ist der Erklärungsversuch, warum beide Voltmeter unterschiedliche Spannungswerte anzeigen. Dazu sei nochmal zur Erinnerung Abb. 5.4 angeführt.

Studierende:

Betrachten wir den Messkreis von U_1 . Der Strom in diesem Kreis fließt durch das Voltmeter über das erste Messkabel (oben) zur Leiterschleife. Dort teilt er sich auf und fließt durch R_1 bzw. R_2 . Danach fließt er durch das zweite Messkabel wieder zurück zum Voltmeter.

Ist nun $R_1 < R_2$, so fließt ein größerer Strom durch R_1 . Dort ist jedoch die eingeschlossene Fläche geringer, daher wird dort weniger Strom induziert. Die kleinere Fläche verursacht einen kleineren Strom als im Messkreis von U_2 . [...]

Die Besonderheit an dieser Vorstellung ist, dass davon ausgegangen wird, dass die Ursache der

unterschiedlichen Spannungen als eine Eigenschaft der mittleren Masche angesehen wird, was auch korrekt ist. Allerdings bestehen Schwierigkeiten beim Herstellen von Zusammenhängen zwischen Induktionsstrom und Fläche.

Dies geht aus Sätzen hervor wie: „Dort ist jedoch die eingeschlossene Fläche geringer.“ und „Dort wird weniger Strom induziert.“, da der Strom ja in einer unverzweigten Masche an allen Stellen gleich sein muss.

5.4.8. Übersicht über die Aspekte des Phänomens

An dieser Stelle sind noch einmal alle Aspekte zusammengefasst, die das Phänomen bietet und welche davon von den Studierenden untersucht wurden.

Aspekt des Phänomens	wurde näher untersucht
unterschiedliche Anzeigewerte	ja
Messkreise flussfrei bei Verdrillung	teilweise
Φ im Messkreis systematisch verändern	nein
Flussdichte Φ messen bzw. abschätzen	einmal
Kabelführungen verändern	ja
Induktionsstromstärke messen	teilweise
Darstellung als Reihenschaltung	einmal
Induktionsspannung U_{Ges} messen	einmal
Fläche der Leiterschleife variieren	ja
Position der Voltmeter und Widerstände	teilweise

Tabelle 5.1.: Zusammenstellung aller Aspekte des Phänomens zum Spannungsbegriff, die von den Seminarteilnehmern beobachtet und untersucht *werden können* bzw. beobachtet und untersucht *wurden*.

5.4.9. Bereitgehaltene Versuchsmaterialien

Folgende Gerätschaften, die verschiedene Gruppen im Laufe ihrer experimentellen Untersuchungen anforderten, wurden von mir bereitgehalten:

1. Digitalmultimeter der Firma CONRAD zur Spannungs- und Strommessung
2. abgeschirmte Messkabel
3. Leitersteckbrett mit Steckbrücken der Firma LEYBOLD
4. Widerstände für Steckbrett $R = 100\Omega, 150\Omega, 420\Omega, 680\Omega, 1k\Omega$. Die Widerstände sollten nicht größer als $1k\Omega$ gewählt werden, da sonst die Stromstärke im Induktionskreis zu klein wird.
5. Silberdraht um eigene Leiterschleifen herstellen zu können.
6. Dauermagnete (Stab- und Hufeisenmagnete) sowie verschiedene Spulen für Induktionsversuche. Für den Versuchsaufbau erzielte ich die besten Erfahrungen mit 300 Windungen und $I_{max} = 4A$.

7. Hall-Sonden (tangential und axial) der Firma LEYBOLD und Computer-Messsystem Casy (LEYBOLD) zur Vermessung von Magnetfeldern.
8. Eisenplatte zur Vergrößerung der wirksamen Fläche des Magnetfeldes.
9. Netzgeräte der Firma LEYBOLD 12/24V 6A Wechsel- und Gleichspannung. Es wird ein verhältnismäßig hoher Spulenstrom benötigt.

5.5. Fazit

Bereits beim ersten Mal, als ich auf dieses Phänomen durch den Aufsatz von Pelster und Hüttl [63] aufmerksam wurde, empfand ich es als sehr interessant und vor allem erklärungsbedürftig. Allerdings wurde mir schnell deutlich, dass ein gewisses Maß an Vorkenntnissen in Bezug auf den Spannungsbegriff beim Experimentator vorhanden sein muss. In den Grundvorlesungen der Studierenden wurde der Spannungsbegriff bereits behandelt und aus Gesprächen mit ihnen geht hervor, dass aus ihrer Sicht das wesentliche Merkmal der Spannung ist, dass sie nur von der Lage der Abgriffspunkte abhängt. Nach meinen Erfahrungen empfinden die Studierenden das Phänomen ebenfalls als erklärungsbedürftig.

Studierende:

Verblüffend daran ist, dass sie (die Voltmeter) unterschiedliche Spannungswerte anzeigen, obwohl sie an den gleichen Messpunkten eingesteckt sind und somit erwartungsgemäß die gleiche Spannung messen müssten.

oder:

Studierende:

Der Stromkreis auf dem Steckbrett ist ein geschlossener Stromkreis, trotzdem zeigen die Voltmeter unterschiedliche Werte an.

oder die Aussage dieser Gruppe:

Studierende:

Diese Beobachtung (der unterschiedlichen Spannungswerte) ist erstaunlich, da sie sich im Widerspruch zu sämtlichen bisherigen Erfahrungen und dem Wissen um den elektrischen Stromkreis zu stehen scheint.

Bereits zu Beginn der Untersuchungen offenbart sich den Seminarteilnehmern der verhältnismäßig hohe experimentelle (und auch fachliche) Anspruch, den das Phänomen an den Experimentator stellt.

Schwierig gestalteten sich die Messungen durch den schon mehrfach erwähnten primitiven Aufbau. Immer wieder haben wir versucht, die gemessenen Werte zu deuten, was jedoch oft wegen des komplizierten Systems aus Leiterschleifen in Widersprüchen endete.

Man kann von den Teilnehmern selbstverständlich nicht erwarten, dass sie ihre Vorstellungen über den Spannungsbegriff in Frage stellen. Auch die bereits ausgebildeten Lehrer, denen ich

das Phänomen vorführte, hielten an ihren Vorstellungen über den Spannungsbegriff fest. „Das ist seltsam: Ich hab doch immer gelernt, dass die Spannung nur von zwei Punkten abhängt bzw. wegunabhängig ist...“ Die meisten Studierenden sprechen immer (nur) von der Induktionsspannung. Ein Beispiel:

Studierende:

Die Ursache eines elektrischen Stromes ist stets eine elektrische Spannung. Bei der Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld entsteht zwischen seinen Enden eine elektrische Spannung, die bei geschlossenem Leiter einen Stromfluss bewirkt.

Obwohl dieses Beispiel natürlich nicht auf viele Studierende verallgemeinert werden darf, zeigt es doch deutlich, welche Fehlvorstellungen hier anscheinend vorherrschen können. Bei Anwesenheit von Induktionseffekten sollte besser auf den Spannungsbegriff verzichtet werden und stattdessen vom Induktionsstrom gesprochen werden [7]. Die Sprechweisen sollten präzisiert werden:

- Bei Gegenwart von Induktion ist die „Spannung zwischen zwei Punkten“ nicht mehr eindeutig definiert. Besser sollte deshalb von der Spannung „entlang eines Weges“ gesprochen werden.
- Ein Voltmeter misst die Spannung entlang eines Widerstandes (über einen Widerstand) nur dann, wenn der Messkreis frei von magnetischen Flussänderungen ist.

Dabei vermeidet man vermutlich auch bei Lernenden die falsche Vorstellung, dass auch in einem nicht geschlossenem Leiter eine Spannung induziert werden kann. Führt man das Experiment in der Realität durch, indem man ein Voltmeter an die Enden des Drahtes anschließt, so wird tatsächlich eine Spannung gemessen. Diese entsteht jedoch nur, da das Voltmeter in seiner Eigenschaft als „umgekehrtes Ampèremeter“ während der Messung für einen „geschlossenen Stromkreis“ sorgt.

Aus diesen Gründen halte ich das Phänomen nur bei Studierenden der Sekundarstufe II für angemessen. Ich habe das Phänomen auch nur mit diesem Kreis von Studierenden durchgeführt. Alle diese Gruppen versuchten, das Phänomen mit dem Spannungsbegriff in Bezug auf das Potential in Verbindung zu bringen. Zwei Gruppen identifizierten die Schaltung als Reihenschaltung und formulierten die Maschenregel. Allerdings wurde dabei die Rolle der Gesamtspannung nur von einer der beiden Gruppen erkannt. Diese berechneten die theoretische Induktionsspannung näherungsweise und konnten damit ihre Vorhersage „bestätigen“. Es lag dabei sowohl ein Fehler bei der Messung, als auch bei der Berechnung vor, die beide (glücklicherweise) zu einem übereinstimmenden Ergebnis von Theorie und Experiment führten.

Einerseits handelt es sich, wie bereits erwähnt, um ein sehr anspruchsvolles Phänomen, sowohl unter fachlichen, als auch unter experimentellen Aspekten. Andererseits bietet es auch für die Experimentatoren die Chance, sich kritisch mit dem (eigenen) Spannungsbegriff auseinander zu setzen.

Die Magnet-Kugelschleife

Bei meinen Recherchen stieß ich eher zufällig auf ein Phänomen aus dem Bereich des Magnetismus, welches mittlerweile auch unter dem Namen „Gauß'sche Kanone“ bekannt geworden ist [45]. Es gibt mittlerweile eine Reihe von Abwandlungen und Varianten dieses Phänomens, die aber alle auf dem gleichen Prinzip beruhen. Letztendlich erhöht sich bei einem elastischen Stoß von Stahlkugeln die Geschwindigkeit auf „geheimnisvolle Weise“. Eine solche Erhöhung der Geschwindigkeit scheint zunächst dem Energiesatz zu widersprechen und kann deshalb eine erklärungsbedürftige Situation für eine offene Experimentierweise darstellen. Allerdings wird in der Literatur dieses Phänomen bis auf wenige Ausnahmen [75] praktisch nicht näher thematisiert, sodass ich mich selbst sehr intensiv damit auseinandersetzte.

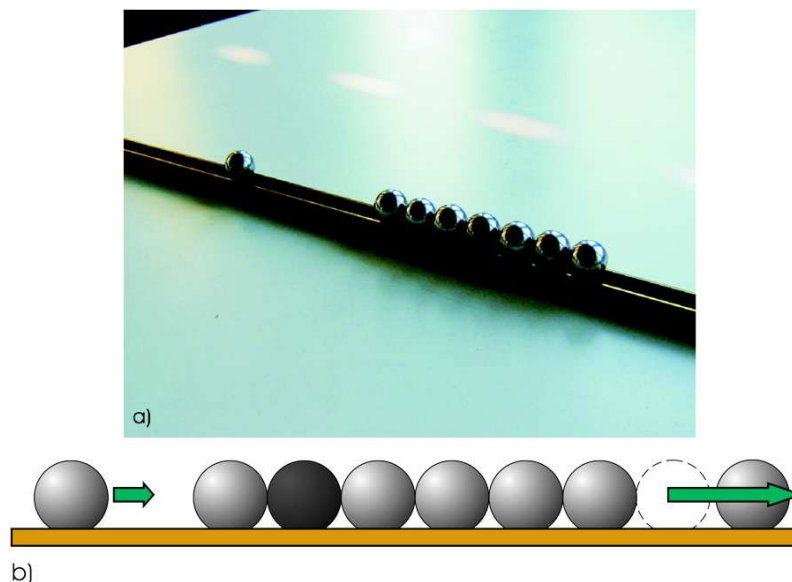


Abbildung 6.1.: a) Experimenteller Aufbau b) Stoßversuch mit magnetischer Kugel (schwarz). Die Geschwindigkeiten der Kugel werden durch grüne Pfeile symbolisiert. Die gestoßene Kugel besitzt eine größere Geschwindigkeit als die einlaufenden.

6.1. Beschreibung des Phänomens

Der Versuchsaufbau in seiner einfachsten Variante besteht aus einer Reihe von Stahlkugeln, die nebeneinander auf einer Schiene liegen. Eine dieser Kugeln ist ein starker NdFeB¹-Magnet. Zu Beginn des Versuches wird dieser zusammen mit den anderen Kugeln nebeneinander auf die Bahn gelegt. Nun wird die erste Kugel von einer einlaufenden, stoßenden Kugel mit der Geschwindigkeit v_S getroffen und führt einen Stoß mit der Kugelmagnetkette aus. Entsprechend dem bekannten Stoßversuch „Klick-Klack“ (Abb. 6.2) löst sich nach dem Stoß nur die letzte Kugel. Die anderen bleiben in Ruhe. Jedoch beobachtet man entgegen allen Erwartungen, dass die Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel v_G größer ist als die der einlaufenden, stoßenden Kugel v_S .



Abbildung 6.2.: Das so genannte „Klick-Klack“ Experiment

6.2. Erste Phase eigener Untersuchungen

Als ich das Phänomen zum ersten Mal selbst aufgebaut und ausprobierte habe, bestand meine Hauptmotivation aus der Klärung der Frage nach der Energie. Natürlich zweifelt man auch dann, wenn ein solches Phänomen beobachtet wird, den Energieerhaltungssatz nicht an, da dieser mittlerweile als eines der fundamentalsten Gesetze der Physik akzeptiert ist. Aus diesem Grund gibt es hier einen Erklärungsbedarf.

1. Wie lassen sich die Beobachtungen mit dem Energie- und Impulserhaltungssatz in Einklang bringen? Wie lassen sich Widersprüche zu diesen Sätzen ausräumen?

Dies war sozusagen meine Ausgangsfragestellung. Um eine Antwort auf diese zu finden, muss eine weitere wichtige Frage beantwortet werden:

2. Von welchen Parametern hängt das Geschwindigkeitsverhältnis v_G/v_S beim Stoß der Kugeln ab?

¹NdFeB=Neodym-Eisen-Bor

6.2.1. Woher kommt die „zusätzliche“ Energie?

Da die gestoßene Kugel eine höhere Geschwindigkeit besitzt als die einlaufende, hat ihre kinetische Energie zugenommen. Offensichtlich ist der Magnet für diesen Effekt verantwortlich, denn wenn man den Magnet aus der Kugelskette entfernt, tritt keine Erhöhung der Geschwindigkeit auf sondern, wie sich später noch herausstellen wird, eine Verringerung der Geschwindigkeit. Die ersten Untersuchungen von mir bestanden darin, verschiedene Stoßversuche mit unterschiedlichen Positionen der magnetischen Kugel innerhalb der Kugelskette zu unternehmen. Ich variierte die Lage der magnetischen Kugel von links nach rechts und beobachtete, wie sich dabei die Geschwindigkeit v_G verändert. Ich bemühte mich dabei, der einlaufenden Kugel möglichst immer die gleiche Geschwindigkeit v_S zu geben (so weit dies im Rahmen dieses noch Freihandcharakters möglich ist). Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von v_G von der Position der magnetischen Kugel innerhalb der Kugelskette und zwar zeigen erste Beobachtungen:

Je weiter die magnetische Kugel von der einlaufenden, stoßenden Kugel entfernt ist, desto kleiner ist die resultierende Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel. Befindet sich die magnetische Kugel in der Mitte² der Kugelskette, so sind die Geschwindigkeiten beider Kugeln gleich groß.

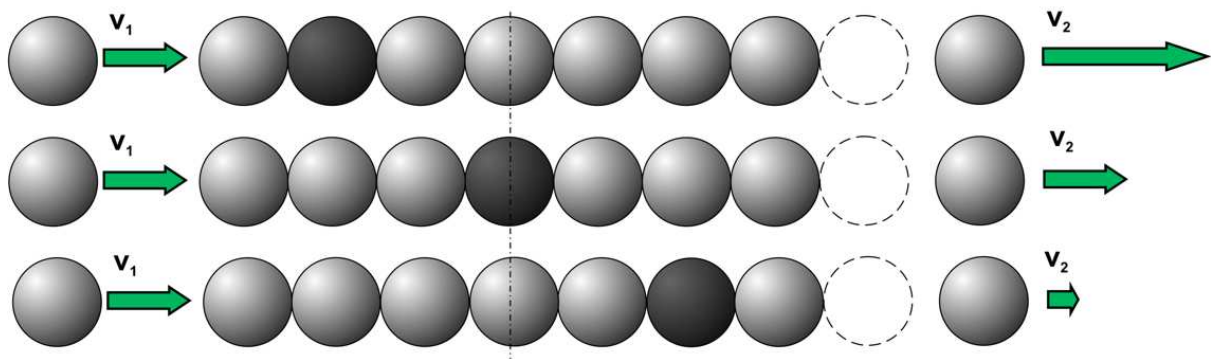


Abbildung 6.3.: Die Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel hängt maßgeblich von der Position der magnetischen Kugel in der Kugelskette ab. Je weiter rechts die magnetische Kugel (hier schwarz dargestellt) positioniert wird, desto kleiner wird die Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel. Dies kann sogar so weit gehen, dass sich beim Stoß keine Kugel mehr ablöst ($v_G = 0$).

Hierbei wird deutlich, dass offensichtlich die Position des Magneten in der Kugelskette für die Geschwindigkeitszunahme verantwortlich ist. Da die gestoßene Kugel eine größere kinetische Energie besitzt als die einlaufende Kugel, muss die zusätzliche Energie vom Magneten stammen. Auf welche Weise „erzeugt“ der Magnet diese zusätzliche Energie? Stellt diese Anordnung möglicherweise sogar ein „perpetuum mobile“ dar? Das Experiment zeigt, dass der Vorgang nicht symmetrisch³ ist. Die zusätzliche kinetische Energie hängt von der Position der magnetischen Kugel in der Kugelskette ab.

Befindet sich ein metallischer Gegenstand in der Nähe eines Magneten, so ziehen sich beide

²Die Mitte der Kugelskette bedeutet: Im Moment indem die einlaufende Kugel die Kugelskette berührt, sind die Abstände zwischen einlaufender Kugel/magnetische Kugel und magnetischer Kugel/gestoßene Kugel gleich groß.

³Damit ist gemeint, dass der Vorgang in umgekehrter Stoßrichtung anders abläuft. Die Geschwindigkeit kann sich in umgekehrter Stoßrichtung auch verkleinern.

gegenseitig an, da der metallische Gegenstand selbst zum Magneten wird. Die Anziehung ist umso stärker, je näher sich beide kommen, und sie ist am größten, wenn beide unmittelbar nebeneinander liegen. Entfernt man Metall und Magnet voneinander, so muss dazu Energie aufgebracht werden. Diese Energie wird wieder frei, wenn sich Metall und Magnet in einer „gewissen Nähe“ befinden und sich aufgrund der Anziehung aufeinander zu bewegen können. Wir betrachten nun den Fall, dass sich die magnetische Kugel in der Mitte der Kette befindet. Rechts und links des Magneten befinden sich gleich viele Kugeln (Abb. 6.3 Mitte). Die einlaufende Kugel und die letzte Kugel in der Kugelskette (die sich lösen wird), werden gleich stark von der magnetischen Kugel angezogen, da sie gleich weit von dieser entfernt liegen⁴. Unmittelbar vor den Stoß wird potentielle (magnetische) Energie in kinetische Energie umgewandelt. Die einlaufende Kugel wird dadurch schneller. Unmittelbar nach dem Stoß wird kinetische Energie in potentielle magnetische Energie umgewandelt. Beide Energieumwandlungen hängen von den Abständen zwischen den Magneten und der stoßenden bzw. der gestoßenen Kugel ab.

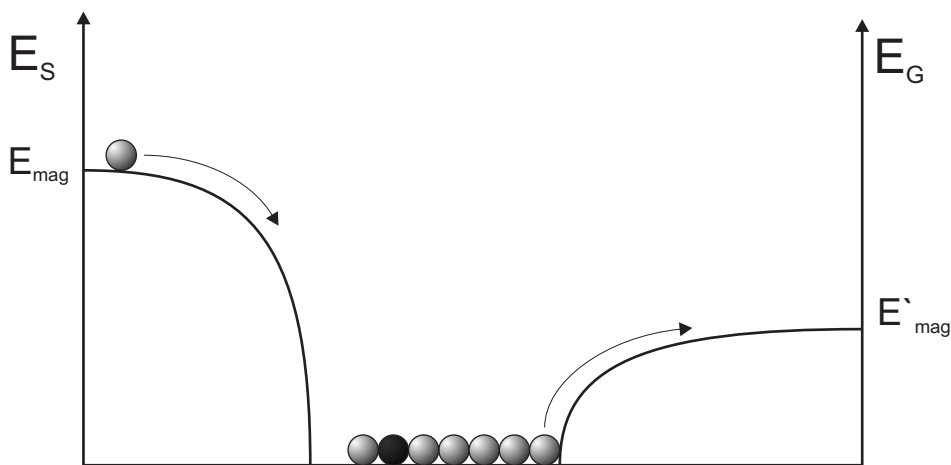


Abbildung 6.4.: Schematische Darstellung der magnetischen potentiellen Energie vor dem Stoß E_{mag} und nach dem Stoß E'_{mag} für den Fall $v_G > v_S$. Der Einfachheit halber wurde die potentielle Energie der Kugeln unmittelbar vor der Kugelskette als gemeinsamer Bezugspunkt gesetzt. Den umgekehrten Fall $v_G < v_S$ erhält man, indem man in Gedanken die Stoßrichtung von rechts nach links umkehrt.

Vernachlässigt man die Rotation der Kugeln, so sind die kinetischen Energien vor und nach dem Stoß in diesem symmetrischen Fall identisch und damit auch die Geschwindigkeiten v_S und v_G . Es gibt prinzipiell zwei mögliche unsymmetrische Fälle:

1. Die magnetische Kugel befindet sich näher an der stoßenden Kugel als an der gestoßenen Kugel (Abb. 6.3 oben). Dadurch ist die frei werdende potentielle Energie vor dem Stoß **größer** als der Anteil an potentieller Energie, der nach dem Stoß für die Entfernung der Kugel vom Magneten aufgewendet werden muss. Dadurch wird: $v_G > v_S$ sein.
2. Die magnetische Kugel befindet sich näher an der gestoßenen Kugel als an der stoßenden Kugel (Abb. 6.3 unten). Dadurch ist die frei werdende potentielle Energie vor dem Stoß **kleiner** als der Anteil an potentieller Energie, der nach dem Stoß für die Entfernung der Kugel vom Magneten aufgewendet werden muss. Dadurch wird $v_G < v_S$ sein.

⁴Der Abstand einlaufende Kugel/magnetische Kugel, sowie magnetische Kugel/gestoßene Kugel beträgt 3 Kugeln.

In Abbildung 6.4 wird dieser Sachverhalt dargestellt. Die potentielle Energie wird durch einen Wall dargestellt, den die Kugel entweder herunter- oder hinauflaufen muss.

Somit können wir verstehen, wie die Beobachtungen im Experiment mit dem Energieerhaltungssatz im Einklang stehen.

Durch die anziehende Wirkung zwischen Kugeln und Magnet wird, abhängig von der Position des Magneten in der Kugelskette, Energie frei oder entzogen. Der Experimentator muss diese Energie zunächst „hineinstecken“, indem er die stoßende Kugel vor der Vorführung des Phänomens von der Kugelskette (dem Magneten) entfernt. Somit muss die scheinbar zusätzliche Energie vom Experimentator selbst aufgebracht werden.

6.2.2. Die Erhaltung des Impulses unter Vernachlässigung der Rollbewegung

Es wird sich später noch herausstellen, dass die Betrachtungen des Impulses im Zusammenhang mit diesem Phänomen recht anspruchsvoll sind. Das liegt unter anderem daran, dass die Rotationsbewegung der Kugeln eine bedeutende Rolle spielt. Dies war mir im jetzigen Zeitpunkt meiner Untersuchungen noch nicht bewusst. Der Impulserhaltungssatz besagt, dass der (Gesamt-)Impuls in diesem, als kräftefrei betrachteten System erhalten bleibt. Dies schien im Fall $v_G = v_S$ offensichtlich erfüllt und keiner weiteren Erklärung bedürftig. Erst später sollte sich zeigen, dass ich bei diesen Betrachtungen (noch unbewusst) Annahmen machte, die in der Realität nicht zutreffen, und daher die „wahre“ Erklärung komplizierter ist. Im derzeitigen Standpunkt meiner Untersuchung ging ich von folgenden Annahmen aus:

1. Im symmetrischen Fall $v_G = v_S$ ist der Impulserhaltungssatz erfüllt.
2. Das Phänomen lässt sich auch irgendwie für den Fall $v_G \neq v_S$ mit dem Impulserhaltungssatz erklären.
3. Bei den Energiebetrachtungen in Kapitel 6.2.1 kann die Rollbewegung der Kugeln unberücksichtigt bleiben.
4. Eine Berücksichtigung der Rollbewegung schien mir für alle weiteren Betrachtungen auch nicht relevant.

Wie verhalten sich die Impulse nun im unsymmetrischen Fall? Zunächst hat die stoßende Kugel eine Geschwindigkeit v_S . Diese wird in unmittelbarer Umgebung des Magneten durch die Anziehung vergrößert. Die Kugel stößt daher mit einer höheren Geschwindigkeit v'_S auf die Kugelskette, und die letzte Kugel der Kugelskette löst sich mit derselben Geschwindigkeit ab: $v_G = v'_S$. Bei diesem Stoß bleibt der Impuls erhalten. Dass diese Beschreibung einige Probleme mit sich bringt, sollte mir in einer ersten gemeinsamen Experimentiersitzung mit ausgebildeten Lehrern deutlich werden.

6.3. Erste Erfahrungen mit Lehrern

Ich führte den Lehrern das Phänomen wie oben beschrieben vor. Meine Intention dabei war die Geschwindigkeitserhöhung. Die Lehrer betrachteten das Phänomen. Nachdem ich das Phäno-

men vorgeführt hatte, fragte ich sie, was ihnen aufgefallen sei. Zunächst antworteten sie nicht. Es fiel ihnen offenbar schwer, hier eine erklärungsbedürftige Situation auszumachen. Ich wiederholte die Vorführung des Phänomens noch einige Male. Nach kurzer Zeit war dann eine erste Reaktion:

Lehrer: Die Kugel hinten hat ja eine größere Geschwindigkeit.

Daraufhin wurden Untersuchungen durchgeführt, die den von mir in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen qualitativen Experimenten entsprechen. Ich war sehr überrascht, dass das für mich offensichtliche und unübersehbare Phänomen der Geschwindigkeitserhöhung von ihnen nicht sofort gesehen wurde. Stattdessen interessierten sie sich für einen (aus meiner Sicht) Nebeneffekt⁵. Ich konnte mir zu diesem Zeitpunkt noch nicht erklären, warum das so auffällige Phänomen der Erhöhung der Geschwindigkeit so schwierig zu beobachten ist. So übergab ich das Experiment den Lehrern, die daraufhin selbst Stoßversuche zunächst ohne Magnet unternahmen. Nach kurzer Zeit machten sie folgende Beobachtungen:

Lehrer: Beim Stoß mit der Kugel lösen sich hinten mehrere Kugeln ab.

Es folgten weitere Untersuchungen, die den von mir in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen qualitativen Experimenten entsprechen. Die Lehrer kamen dabei zu den Ergebnissen, dass:

- der Magnet für die Geschwindigkeitszunahme verantwortlich ist,
- kein Problem mit der Energieerhaltung gesehen wird (Die zusätzliche Energie „kommt vom Magneten“),
- ebenfalls kein Problem mit der Impulserhaltung gesehen wird (Die Argumentation verlief analog zu der in Abschnitt 6.2.2),
- die Rotationsbewegung der Kugeln bei den Betrachtungen **nicht** vernachlässigt werden darf. Das Phänomen tritt nur bei rotierenden Kugeln auf (Vermutung).

Von diesen Punkten ausgehend entstand eine Gesprächsrunde, in der wir die einzelnen Punkte ausgiebig diskutierten. Die Aussage: „Die Energie kommt aus dem Magnetfeld.“ kann in dieser Form natürlich keineswegs als erklärend angesehen werden. Die Aussage fordert geradezu die Frage heraus, woher das Magnetfeld diese Energie nimmt. Im Laufe des Gesprächs kristallisierten sich ähnliche Argumente wie in Abschnitt 6.2.1 heraus. Im Laufe der Diskussion des Impulses wurden auch mir erste Lücken meiner bisherigen Vorstellungen deutlich. Die Sichtweise in Abschnitt 6.2.2 zieht ausschließlich die unmittelbare Stoßsituation in Betracht. Die Erhaltung des Impulses muss aber in einer viel allgemeineren Form, also auch weit vor und nach dem Stoß gelten. Diese Tatsache lenkte die Diskussion auf einen anderen Schwerpunkt. Sie stellte sich die Frage:

⁵Vor einigen Jahren zeigten Hermann et. al. [34, 33], dass aufgrund von Dispersion die Beschreibung des Phänomens durch Energie und Impuls allein nicht ausreicht. Deshalb müssen wir bei allen folgenden Betrachtungen voraussetzen, dass alle Kugeln der Kugelskette in direktem Kontakt stehen. Das Ablösen mehrerer Kugeln kann durch Dispersion erklärt werden.

Lehrer: Stellt das Phänomen „Magnet-Kugelskette“ überhaupt ein kräftefreies System dar?

Bis hin zu diesem Zeitpunkt war diese Frage für mich (und auch für die Lehrer) mit einem eindeutigen „Ja“ zu beantworten. Dabei galt die Voraussetzung, dass die Kugeln nicht rollen und somit reibungsfrei auf der Messingbahn gleiten. Erst in diesem Moment kamen Zweifel auf, da von den Lehrern die Rotationsbewegung der Kugeln für sehr wichtig und keinesfalls als vernachlässigbar angesehen wurde. Es rückten daher neue, wichtige Fragen in den Mittelpunkt der Untersuchungen:

1. Welche Rolle spielt die Rotationsbewegung der Kugeln im Zusammenhang mit diesem Phänomen. Welche neuen Aspekte ergeben sich bei Berücksichtigung der Rollbewegung?
2. Was ändert sich an der Betrachtung der Impulse, wenn es sich bei dem Phänomen nicht um ein abgeschlossenes System handelt?

All dies sind Fragen, die auch ich zu diesem Zeitpunkt nicht befriedigend beantworten konnte, was darauf hinweist, dass das Phänomen von mir selbst noch nicht ausreichend verstanden war. Es sind demnach weitere, tiefer gehende Untersuchungen nötig. Im nächsten Schritt rückte ich die Rollbewegung der Kugeln in das Zentrum der weiteren Betrachtung.

6.4. Zweite Phase eigener Untersuchungen

Das Ziel der folgenden Betrachtungen soll eine Beschreibung des Phänomens unter Berücksichtigung der Rollbewegung der Kugeln sein. Dazu wird eine neue Energiebetrachtung erforderlich, da nun eine weitere Komponente, die Rotationsenergie der Kugeln hinzukommt.

6.4.1. Energetische Beschreibung unter Berücksichtigung der Rollbewegung

Die Gesamtenergie einer rollenden Kugel ist die Summe aus Translations- und Rotationsenergie

$$E_T + E_R = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

Der Translationsanteil E_T und der Rotationsanteil E_R stehen über die Geometrie in einem engen Zusammenhang. Ist r der effektive Radius der Kugel (siehe Abb.6.5) und v die Translationsgeschwindigkeit, so gilt $v = \omega/r$ und man kann schreiben:

$$E_T + E_R = \left(1 + \frac{I}{mr^2}\right) \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{\beta} E_T \quad (6.1)$$

Dabei wurde der so genannte Geometriefaktor β eingeführt, der ausschließlich durch geometrische Parameter bestimmt ist. Die Größe I ist das Trägheitsmoment der Kugel bezogen auf ihren Schwerpunkt/Mittelpunkt.

$$\beta = \left(1 + \frac{I}{mr^2}\right)^{-1}. \quad (6.2)$$

Eine Kugel habe die Masse m und den Radius R , sowie das Trägheitsmoment $I = \frac{2}{5}mR^2$. Dann ergibt sich durch die Geometrie der rinnenförmigen Bahn (vgl. Abb. 6.5).

$$r^2 = R^2 - \frac{d^2}{4} \quad (6.3)$$

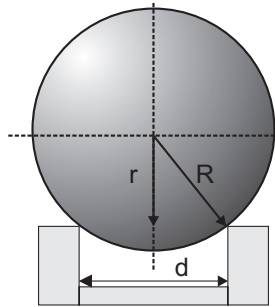


Abbildung 6.5.: Geometrie der Messingbahn

Durch Einsetzen von (6.3) in (6.2) erhält man eine Darstellung für β , in der nur noch geometrische Parameter der Kugel und der Bahn vorkommen.

$$\beta = 1 - \frac{8}{28 - 5\frac{d^2}{R^2}}. \quad (6.4)$$

Um den Stoßvorgang besser energetisch beschreiben zu können, zerlegen wir den gesamten Stoßprozess in einzelne Teilschritte, die nacheinander betrachtet werden.

6.4.1.1. Die Kugel kommt aus dem Unendlichen

Es gibt insgesamt drei Energieformen, die es zu berücksichtigen gilt: Die Translationsenergie E_T , die Rotationsenergie E_R und die potentielle Energie aufgrund des Magneten E_{mag} . Dabei sei die magnetische potentielle Energie einer Kugel gleich null, wenn sie sich unendlich weit vom Magneten entfernt befindet.

Eine Kugel komme aus dem Unendlichen und rolle auf die Kugelskette zu. Wenn die Kugel noch weit von der Kette entfernt ist, beträgt die Gesamtenergie gemäß (6.1):

$$E_{R_S} + E_{T_S} = \frac{1}{\beta} E_{T_S} \quad (6.5)$$

Dabei bezeichnen wir die Translations- und Rotationsenergien mit einem weiteren Index S für „stoßende Kugel“

6.4.1.2. Die Kugel unmittelbar vor Kollision mit der Kugelkette

Die einlaufende, stoßende Kugel befinde sich nun unmittelbar vor der Kette, sodass diese bereits durch den Magneten beschleunigt wurde. Die Bewegungsenergie hat demnach zugenommen, da potentielle magnetische Energie in Bewegungsenergie umgewandelt wurde.

$$\frac{1}{\beta} E_{T_2} = \frac{1}{\beta} E_{T_S} + E_{mag}$$

$$E_{T_2} = E_{T_S} + \beta E_{mag} \quad (6.6)$$

6.4.1.3. Stoß und Übergang vom Rutschen ins Rollen

Beim Stoß wird keine Rotationsenergie der einlaufenden Kugel übertragen. Es ist also nur der Translationsbeitrag E_{T_2} von Bedeutung. Dieser Anteil wird nach dem Stoß auf der anderen Seite der Kette durch Reibung in Translations- **und** Rotationsenergie umgewandelt. Unmittelbar nach dem Stoß rutscht⁶ die gestoßene Kugel zunächst noch etwas. Diese Bewegung geht dann nach kurzer Zeit in eine Rollbewegung über. Um Aussagen über die Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel machen zu können, muss die Drehimpulserhaltung berücksichtigt werden:

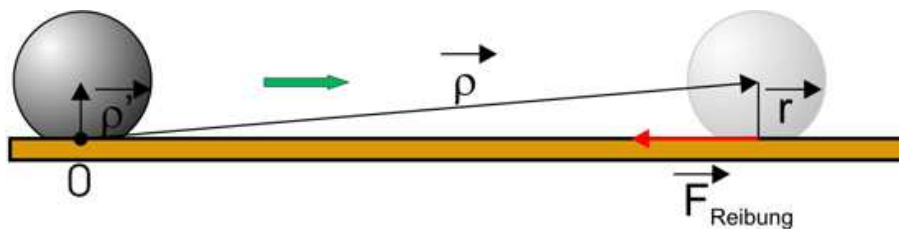


Abbildung 6.6.: Übergang vom Rutschen ins Rollen. Auf der Linken Seite rutscht die gestoßene Kugel unmittelbar nach dem Stoß noch ein wenig, bis die Rutschbewegung allmählich in eine Rollbewegung übergeht, die auf der rechten Seite dargestellt ist.

Der Drehimpuls bezüglich eines festen Bezugspunktes 0 bleibt erhalten, wenn die Summe aller Drehmomente bezüglich dieses Bezugspunktes null ergibt. Da ausschließlich die Reibungskraft an die Kugel angreift, und zwar im Auflagepunkt, führt diese Kraft zu keinem Drehmoment bezüglich dieses Punktes auf der Bahn. Der Drehimpuls bezogen auf den „Nullpunkt“ ist somit konstant. Der Sachverhalt wird in Abb. 6.6 dargestellt: Auf der linken Seite **rutscht** die Kugel unmittelbar nach dem Stoß noch mit der Geschwindigkeit v'_3 . Bezogen auf den Nullpunkt (beliebig festgelegten Auflagepunkt) ist der Drehimpuls gegeben durch:

⁶Die Betrachtung des Übergangs vom Rutschen ins Rollen stellt eine Verbesserung der theoretischen Beschreibung dar, die erst später von Bedeutung wurde. Im ersten Ansatz blieb der Übergang vom Rutschen ins Rollen unberücksichtigt. Dabei zeigten sich aber zu große Abweichungen von der daraus abgeleiteten Theorie zum Experiment.

$$|\vec{L}'| = m|\vec{\rho}' \times \vec{v}_3'| = mrv_3'. \quad (6.7)$$

Auf der rechten Seite **rollt** der Ball mit der Geschwindigkeit v_3 . Der Drehimpuls ist nun:

$$\begin{aligned} |\vec{L}| &= m|\vec{\rho} \times \vec{v}_3| + I\omega_3 \\ &= mrv_3 + I\frac{v_3}{r} = \left(1 + \frac{I}{mr^2}\right) mrv_3. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Mit Hilfe von Gleichung (6.2) ergibt sich die Drehimpulserhaltung $|\vec{L}'| = |\vec{L}|$:

$$mrv_3' = \frac{1}{\beta} mrv_3 \quad (6.9)$$

und wir erhalten

$$v_3 = \beta v_3'. \quad (6.10)$$

Da die kinetische Energie proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist, gilt:

$$E_{T_3} = \beta^2 E_{T_3}' \quad (6.11)$$

und da, wie bereits erwähnt, nur der Translationsanteil E_{T_2} beim Stoß übertragen wird, ($E_{T_3}' = E_{T_2}$) erhalten wir:

$$E_{T_3} = \beta^2 E_{T_2} \quad (6.12)$$

6.4.1.4. Die gestoßene Kugel rollt ins Unendliche

Entsprechend dem Ansatz aus Abschnitt 6.4.1.2 Gleichung (6.6) für die einlaufende Kugel, ergibt sich für die Translationsenergie der gestoßenen Kugel:

$$E_{T_G} = E_{T_3} - \beta E_{mag}' \quad (6.13)$$

Dabei wird die Translationsenergie kleiner, da ein Teil beim Rollen „gegen“ das Magnetfeld in potentielle magnetische Energie E_{mag}' umgesetzt wird.

Somit kann eine Beziehung zwischen den Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß, die *Stoßgleichung*, abgeleitet werden.

$$\begin{aligned} E_{T_G} = E_{T_3} - \beta E_{mag}' &= \beta^2 E_{T_2} - \beta E_{mag}' \\ &= \beta^2 (E_{T_S} + \beta E_{mag}) - \beta E_{mag}' \\ &= \beta^2 E_{T_S} + \beta (\beta^2 E_{mag} - E_{mag}') \end{aligned}$$

$$v_G^2 = \beta^2 v_S^2 + \frac{2\beta}{m} (\beta^2 E_{mag} - E'_{mag}) \quad (6.14)$$

Dabei wird angenommen, dass die Masse m der Kugeln S und G identisch ist. Der Geometriefaktor β ist durch Gleichung (6.4) gegeben und E_{mag} bzw. E'_{mag} sind die Terme der magnetischen potentiellen Energien vor und nach dem Stoß.

6.4.2. Folgerungen

Welche Schlussfolgerungen können nun aus dieser neuen und etwas komplizierten Energiebetrachtung gezogen werden? Betrachten wir dazu einige Sonderfälle, um die Konsistenz dieser Theorie zu prüfen.

Die Gleichung (6.14) kann folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$\begin{aligned} v_G^2 &= v_S^2 - (1 - \beta^2) v_S^2 \\ &\quad + \frac{2\beta}{m} (E_{mag} - E'_{mag}) - \frac{2\beta}{m} (1 - \beta^2) E_{mag} \\ \iff \frac{1}{\beta} \Delta E_T &= -(E'_{mag} - E_{mag}) - (1 - \beta^2) \left(\frac{1}{\beta} E_{TS} + E_{mag} \right) \\ \iff \Delta E_{kin} + \Delta E_{mag} &= -(1 - \beta^2) (E_{kin_S} + E_{mag}) \\ \Delta E_{ges} &= -(1 - \beta^2) E_{ges} \end{aligned} \quad (6.15)$$

ΔE_{ges} ist die Gesamtenergie, die beim Stoß verlorengeht. Daraus ergibt sich Folgendes:

1. Die Gesamtenergie unter Berücksichtigung der magnetischen potentiellen Energie bleibt genau dann erhalten, wenn die Kugeln nicht rollen ($\beta = 1$). Sonst geht Energie (in Form von Wärme) verloren – und zwar umso mehr, je breiter die Bahn ist.
2. Bei rollenden Kugeln ist der Energieverlust ΔE_{ges} proportional zur Anfangsgesamtenergie. Er ist damit (überraschenderweise) auch vom Magneten abhängig. Das liegt daran, dass durch den Magneten die stoßende Kugel beim Stoß schneller ist und dadurch mehr Energie in Form von Rotationsenergie verloren geht.
3. Sonderfälle bei rollenden Kugeln:
 - a) kein Magnet, kein Rollen: $\beta = 1$ und $\Delta E_{mag} = 0$, sowie $E_{mag} = 0$:

$$\Delta E_{kin_S} = 0 \iff v_G = v_S$$

- b) Magnet, aber kein Rollen: $\beta = 1$ und $\Delta E_{mag} \neq 0$, sowie $E_{mag} > 0$

$$\begin{aligned} \Delta E_{kin} &= -\Delta E_{mag} \\ v_G &= v_S - \frac{2}{m} \Delta E_{mag} \end{aligned}$$

Hier erkennt man deutlich, dass sich in der symmetrischen Situation (Magnet „in der Mitte“) wegen $\Delta E_{mag} = 0$ die Geschwindigkeit nicht ändert.

c) Rollen, aber kein Magnet $\beta \neq 1$ und $\Delta E_{mag} = 0$, sowie $E_{mag} = 0$:

$$\begin{aligned}\Delta E_{kin} &= -(1 - \beta^2)E_{kinS} \\ v_G &= \beta v_S\end{aligned}$$

Das Rotationsverhalten der Kugeln wird maßgeblich durch den Geometriefaktor β abgebildet.

$$v_G = \beta v_S \quad (\text{rollende Kugeln ohne Magnet}) \quad (6.16)$$

Dabei hängt β bei konstantem Kugelradius R nur von der Breite d der Bahn ab. Für den Fall $d \rightarrow 0$ wird $\beta = 5/7$, und die gestoßene Kugel ist um den Faktor $5/7$ langsamer als die stoßende. In diesem Fall rollen die Kugeln praktisch auf einer ebenen Fläche. Für maximal $d \rightarrow 2R$ ist das U-Profil genauso breit, wie der Durchmesser der Kugeln. Die gesamte Bewegungsenergie steckt dann in der Rotation und geht deshalb beim Stoß verloren.

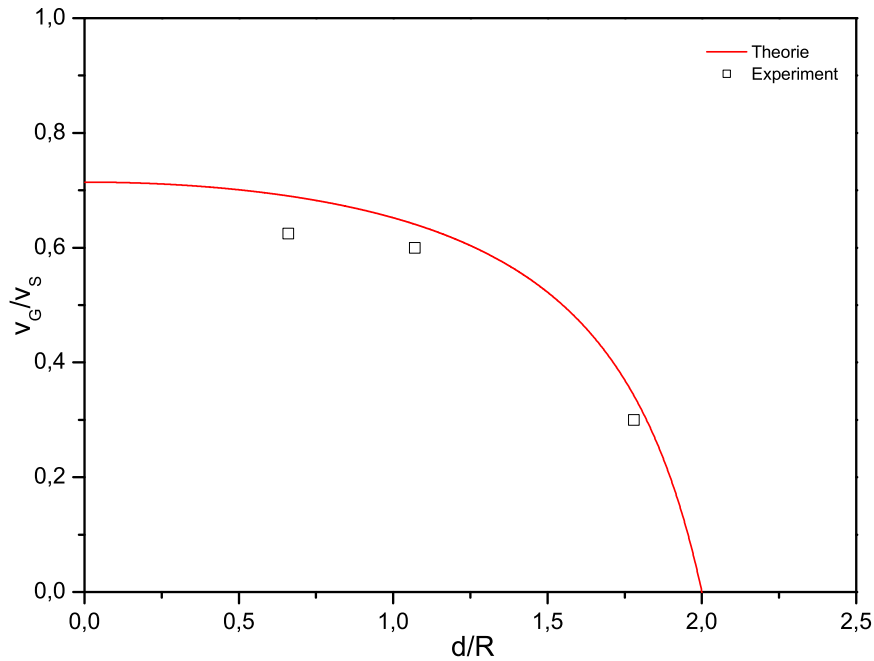


Abbildung 6.7.: Stoßversuch mit rollenden Kugeln ohne Magnet. Zusammenhang zwischen theoretisch erwartetem Geschwindigkeitsverhältnis $\beta = v_G/v_S$ und (rote Linie) und den experimentell bestimmten Daten (Quadrate).

Da der Geometriefaktor β immer kleiner als eins ist, gilt für rollende Kugeln nach Gleichung (6.16) in jedem Fall:

$$v_G < v_S$$

Dies war eine wichtige theoretische Vorhersage, denn bis dahin bin ich davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeiten der einlaufenden, stoßenden Kugel und der gestoßenen Kugel im Idealfall gleich groß sind. Offensichtlich ist dies bei Berücksichtigung des Rollverhaltens nicht mehr der Fall. Je größer die Breite d des U-Profiles wird, desto kleiner wird auch β und desto kleiner wird das Geschwindigkeitsverhältnis v_G/v_S . In der Praxis hat β in einem weitem Bereich einen relativ konstanten Wert. Gemäß Abbildung 6.7 kann β als nahezu konstant angenommen werden ($\beta \approx 5/7$), wenn $d/R \leq 1$ ist. In diesem Fall, also wenn der Bahndurchmesser kleiner als der Radius einer Kugel ist, beträgt die Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel etwa 70 Prozent der der stoßenden Kugel. Im Experiment kann man dies auch qualitativ bestätigen, indem man die Kugel ohne Magnet stoßen lässt. Allerdings ist der Effekt (qualitativ) nicht sehr deutlich zu sehen, und man muss bei den Beobachtungen schon eine Erwartungshaltung für das haben, was beobachtet werden wird. Der Experimentator muss quasi schon im Vorfeld „wissen, was er gleich sehen wird“.

Die theoretischen Vorhersagen wurden quantitativ mit der Motion-Capturing- Software VIANA [46] überprüft, indem die Geschwindigkeiten der stoßenden und der gestoßenen Kugel (durch mehrere Einzelmessungen) gemessen wurden. Die Ergebnisse⁷ werden durch die quadratischen Messpunkte in Abbildung 6.7 dargestellt. Sie stehen im Einklang mit der Vorhersage aus Gleichung (6.16).

Im allgemeinen Fall, bei rollenden Kugeln und einem Magneten in der Kugelskette, ist die Diskussion von (6.14) komplizierter, deshalb betrachten wir folgende Umformung von (6.15):

$$\begin{aligned}\Delta E_{ges} &= -(1 - \beta^2)E_{ges} \\ \Delta E_{kin} + \Delta E_{mag} &= -(1 - \beta^2)(E_{kin_S} + E_{mag}) \\ \Delta E_{kin} &= -(1 - \beta^2)(E_{kin_S} + E_{mag}) - \Delta E_{mag}\end{aligned}\tag{6.17}$$

Angenommen der Magnet befindet sich im linken Teil der Kugelskette, also in der Nähe der einlaufenden Kugel (Abb. 6.3, oberstes Bild), so ist $\Delta E_{mag} = E'_{mag} - E_{mag} < 0$. Der erste Teil von (6.17) ist negativ und hängt bei festem β im Wesentlichen von der kinetischen Energie der einlaufenden Kugel ab. Die Zunahme der kinetischen Energie ΔE_{kin} ist dann bei festem $\Delta E_{mag} < 0$ groß, wenn der Term: $-(1 - \beta^2)(E_{kin_S} + E_{mag})$ dem Betrag nach klein wird. Dies ist entweder für große Werte von β , oder für kleine Werte von E_{kin_S} der Fall.

Das Phänomen der „zunehmenden Geschwindigkeit“ ist deshalb umso eindrucksvoller, je kleiner v_S gewählt wird. In Abbildung 6.8 sind Zusammenhänge zwischen den Geschwindigkeiten (Gl. 6.14) für verschiedene typische experimentellen Parameter dargestellt. Die gestrichelte Linie repräsentiert die Bedingung $v_G = v_S$. Für alle Punkte oberhalb dieser Linie gilt $v_G > v_S$. So ist es demnach vermutlich zu erklären, warum für die Lehrer das aus meiner Sicht offensichtliche Phänomen der Geschwindigkeitserhöhung bei der Vorführung unbeobachtet blieb.

Bei der Vorführung des Phänomens sollte die Geschwindigkeit der einlaufenden Kugel v_S daher möglichst klein gewählt werden.

⁷Abb. 6.7 zeigt die Ergebnisse dreier Stoßversuche mit verschiedenen Kugel/Bahn Geometrien. Jedes Geschwindigkeitsverhältnis wurde aus den Mittelwerten mehrerer Einzelmessungen bestimmt.

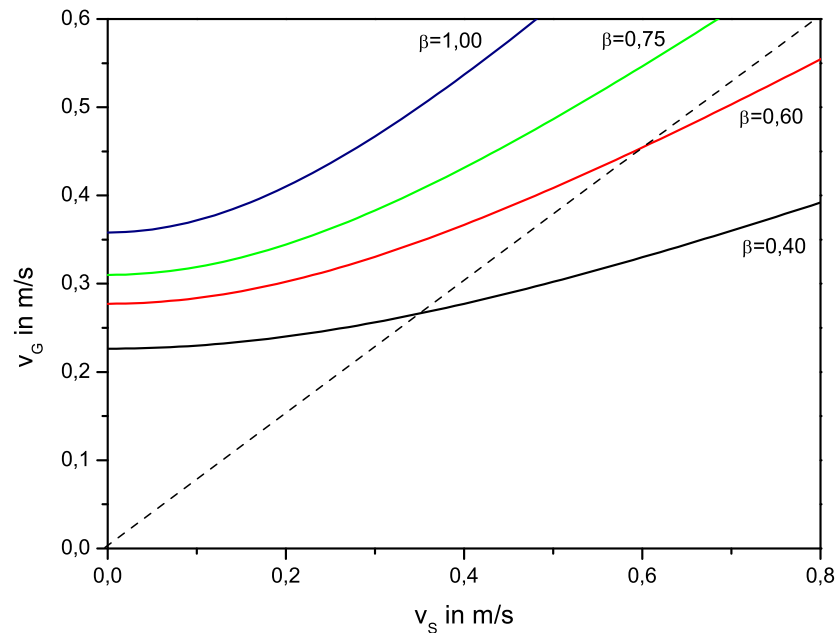


Abbildung 6.8.: Theoretische Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_G von v_S nach Gleichung (6.14) für Werte der magnetischen Terme $E_{mag} = 10mJ$ und $E'_{mag} = 2mJ$ (Die Bestimmung der magnetischen Energien wird im Kapitel 6.4.3 beschrieben.), sowie für verschiedene Geometrien β .

Diesen Sachverhalt hatte ich bei allen Vorführungen bis dahin nicht beachtet. Aufgrund der Tatsache, dass ich schon im Vorfeld wusste, was ich sehen wollte, schien mir das Phänomen unabhängig von v_S immer gleich deutlich zu sein.

6.4.3. Bestimmung der magnetischen potentiellen Energie

Für eine Messung der magnetischen potentiellen Energie wird der in Abbildung 6.11 dargestellte Aufbau zu Grunde gelegt. Ein Kraftmesser wurde an einer durch eine Schraube sehr fein höhenverstellbaren Aufhängung befestigt. An diesem Kraftmesser hängt eine Stahlkugel, die im Ruhezustand von der unmittelbar darunter liegenden magnetischen Kugelskette gehalten wird. Es wurde die Kraft gemessen, die zum Ablösen der Stahlkugel von der Kugelskette nötig ist, indem die Schraube nach oben gedreht wurde und der Kraftmesser im Moment des Ablösens abgelesen wurde. Die Messung wurde für zwei verschiedene Positionen der magnetischen Kugel innerhalb der Kugelskette durchgeführt. Um eine abstandsabhängige Messung zu ermöglichen, wurden Kunststoffscheiben bekannter Dicke zwischen Kette und Stahlkugel gebracht. Auf diese Weise konnte die Kraft $F(z)$ gemäß Abb. 6.10a für zwei verschiedene Positionen des Magneten in der Kette bestimmt werden.

Die magnetische potentielle Energie, die man aufbringen muss, um die Kugel aus einem Abstand z_0 vom Magneten zu entfernen ergibt sich aus der Beziehung:



Abbildung 6.9.: Versuchsaufbau zur Bestimmung der magnetischen potentiellen Energie. Ein Kraftmesser hängt an einer höhenverstellbaren Anordnung. Es wird die Kraft gemessen, die zum Ablösen der Kugeln von der magnetisierten Kette benötigt wird.

$$E_{mag} = \int_0^{\infty} F(z) dz \quad (6.18)$$

Durch numerische Integration der gemessenen Daten aus Abbildung 6.10 a wurde die potentielle Energie bestimmt (Abb. 6.10b). Daraus ergeben sich die folgenden Werte für die relevanten Magnettermen:

$$\begin{aligned} E_{mag} &\approx 10mJ && \text{(eine Kugel vor dem Magnet)} \\ E'_{mag} &\approx 2mJ && \text{(zwei Kugeln vor dem Magnet)} \end{aligned} \quad (6.19)$$

Unter Berücksichtigung der Geometrie unserer Standardanordnung ($\beta = 0.64$), finden wir für den magnetischen Energieterm in Gleichung (6.14):

$$\beta^2 E_{mag} - E'_{mag} \approx 2mJ. \quad (6.20)$$

6.4.4. Experimentelle Überprüfung der Stoßgleichung

Da wir nun gemessene Werte der magnetischen potentiellen Energie besitzen, besteht die Möglichkeit, die theoretischen Vorhersagen, die die Stoßgleichung (6.14) macht, unmittelbar im Experiment zu überprüfen. Dazu wurden mehrere Stoßversuche mit einer Kugel vor dem Magneten und zwei Kugeln hinter dem Magneten durchgeführt (Abb. 6.11).

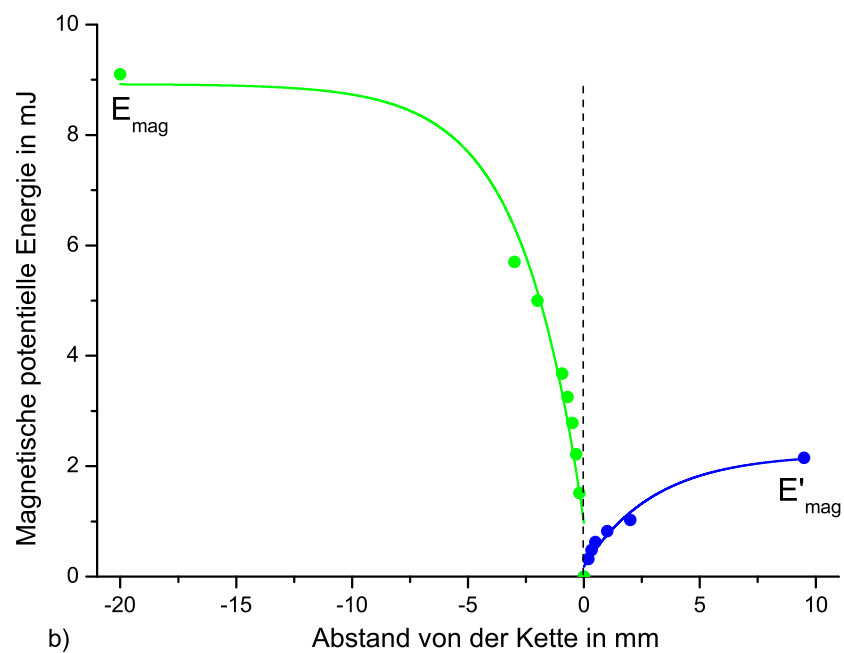
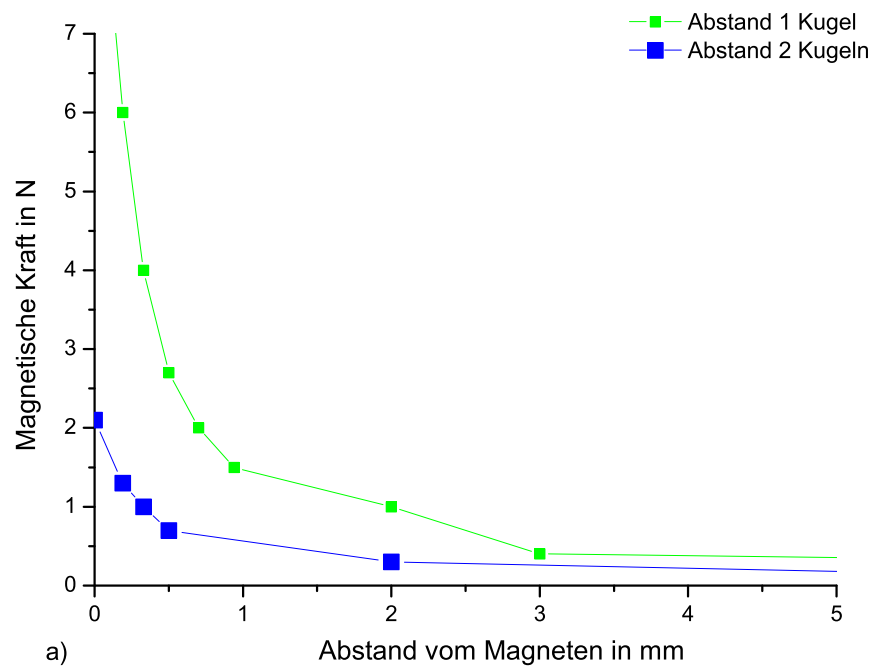


Abbildung 6.10.: Abstandsabhängigkeit der magnetischen Kraft (oben) und der magnetischen potentiellen Energie (unten).

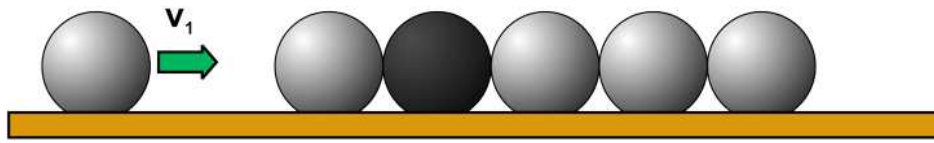


Abbildung 6.11.: Experimenteller Versuchsaufbau, um Gleichung (6.14) zu überprüfen.

In diesem Fall haben die magnetischen Energien die bereits im obigen Abschnitt gemessenen Werte ($E_{mag} = 10mJ$, $E'_{mag} = 2mJ$). Es wurden Stoßversuche mit verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten v_S durchgeführt, bei denen jeweils die Geschwindigkeiten v_S und v_G mit Hilfe der VIANA-Software gemessen wurden. Die geometrischen Verhältnisse der Versuchsbahn ergaben $\beta = 0,64$. Die Ergebnisse werden in Abbildung 6.12 dargestellt.

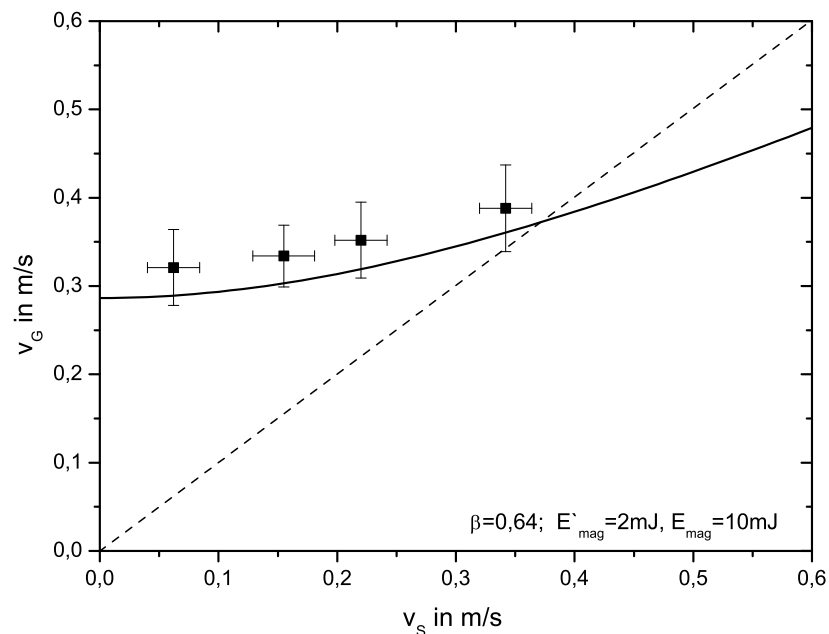


Abbildung 6.12.: Experimentelle Werte der Geschwindigkeit und theoretische Vorhersage nach Gleichung (6.14)

Es zeigt sich, dass die experimentell gefundenen Daten (die vier Messpunkte) in befriedigendem Einklang mit der Theorie stehen. Man kann abschließend festhalten, dass durch die Darstellung in Abbildung 6.12 die Stoßgleichung (6.14) im Rahmen der möglichen Genauigkeit durch das Experiment als bestätigt angesehen werden kann.

6.4.5. Die (neue) Diskussion der Impulserhaltung

Die ersten Erfahrungen, die ich im Rahmen dieses Phänomens zusammen mit den Lehrern sammeln konnte, haben gezeigt, dass auch bei der Diskussion des Impulses noch Erklärungsbedarf

herrscht. Insbesondere müssen dabei auch die neu gewonnenen Erkenntnisse aus der quantitativen Energiebetrachtung berücksichtigt werden.

Im Rahmen der weiteren Diskussion gehe ich daher von folgenden vereinfachenden Annahmen aus:

1. Der Magnet befinde sich an erster Stelle in der Kugelskette. Die weitere Argumentation lässt sich aber ohne weiteres auch auf allgemeinere Situationen übertragen.
2. Der Magnet besitzt einen „endlichen“ Einflussbereich, d.h. eine Kugel muss sich mindestens in einem endlichen Abstand r_0 vom Magneten befinden, um von diesem angezogen zu werden.
3. Die Geschwindigkeit der einlaufenden Kugel ist null, d.h. die einlaufende Kugel befindet sich zur Zeit $t = 0$ am Ort r_0 in Ruhe.

Der Impulserhaltungssatz besagt:

Wenn die Summe aller äußeren Kräfte auf ein physikalisches System null ist (äußerlich kräftefrei), dann bleibt der Gesamtimpuls des Systems konstant.

Bei dieser Sprechweise ist es nötig und wichtig, erstens genau deutlich zu machen, was man hier unter dem Begriff „physikalisches System“ versteht, und zweitens muss festgestellt werden, ob es sich bei dem betrachteten System um ein „äußerlich kräftefreies“ handelt oder nicht. Diese Anregung wurde bereits von den Lehrern gegeben.

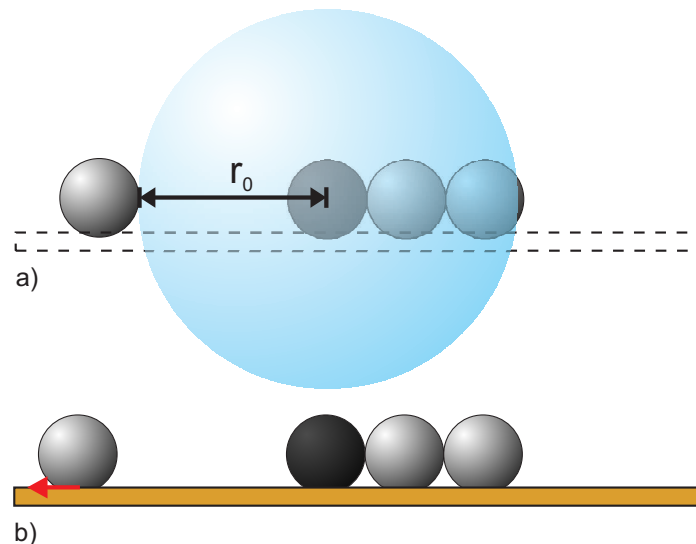


Abbildung 6.13.: Zur Diskussion des Impulses: a) Die Kugeln rotieren während des Stoßes nicht. b) Die Reibungskraft (rot) zwischen den Kugeln und der Bahn führt dazu, dass die Kugeln rotieren. Der „Einflussbereich“ des Magneten mit einem Radius r_0 wird hellblau dargestellt.

6.4.5.1. Vernachlässigung der Rollbewegung

Letztendlich ist die Reibung zwischen den Kugeln und der Bahn für die Rollbewegung der Kugeln verantwortlich. Ohne Reibung gleiten die Kugeln ohne zu rotieren in der Bahn. **Das System (S_1) besteht in diesem Fall ausschließlich aus der einlaufenden Kugel und der restlichen Kugelkette inklusive Magnet.** Man kann auch sagen: Sämtliche Kugeln stehen nicht mit der Erde/der Bahn im Kontakt. Da laut Vereinbarung die Reibung zwischen den Kugeln und der Bahn vernachlässigt bleibt, existieren auch keine Reibungskräfte.

Die Kette inklusive Magnet sei in Ruhe. Die einlaufende Kugel befinde sich (laut Vereinbarung) im Abstand r_0 vor dem Magneten bzw. der Kette (ebenfalls in Ruhe vgl. Abb. 6.13). Der Gesamtimpuls im betrachteten System ist demnach null. Durch die Wechselwirkung zwischen Kugeln und Magneten wird die einlaufende stoßende Kugel aus der Ruhe heraus beschleunigt. Diese Impulsänderung wird durch die Beschleunigung der gesamten restlichen Kette in die entgegengesetzte Richtung kompensiert. Die Kugelkette bewegt sich (wegen ihrer großen Masse) vergleichsweise langsam auf die einlaufende Kugel zu. Experimentell habe ich dies mit Hilfe eines „Klick-Klacks“ überprüft, da hier sich die Kugeln tatsächlich reibungsfrei bewegen. Zusätzlich wurde ein kleiner starker Magnet in die Kugelkette integriert. Beim Stoß zeigt sich tatsächlich, dass die Kette+Magnet eine leichte Bewegung in Richtung der einlaufenden Kugel ausführt.

6.4.5.2. Impulsbetrachtung bei rollenden Kugeln

Nun berücksichtigen wir die Reibung zwischen den Kugeln und der Bahn und somit auch die Rotationsbewegung. Es ist in diesem Zusammenhang nicht nötig, die Rotationsenergie näher zu betrachten, da wir in Abschnitt 6.4.1 gezeigt haben, dass sich die Gesamtenergie durch den reinen Translationsbeitrag ausdrücken lässt (Gleichung 6.1). Die Betrachtung der Reibung hat zwei wesentlich neue Konsequenzen.

1. Das „System“ S_1 =Kugel+Magnetkette, welches wir im obigen Abschnitt diskutierten, **ist jetzt nicht äußerlich kräftefrei**, da eine zusätzliche äußere Kraft, die Reibungskraft vorkommt.
2. Die Reibungskraft entsteht dadurch, dass die Kugeln mit der Erde⁸ wechselwirken. Berücksichtigt man dies, indem man das neue System S_2 =Kugel+Magnetkette+Erde einführt, **so entsteht dadurch ein äußerlich kräftefreies S_2 .**

Daher ist es sinnvoll, bei Berücksichtigung der zusätzlichen Reibungskraft in das System S_2 überzugehen, da es sich hierbei um ein kräftefreies System handelt, für das der Impulssatz gültig ist. Die Impulszunahme durch die magnetische Anziehung wird dann dadurch kompensiert, dass sich Magnetkette+Erde auf die einlaufende Kugel zu bewegen. Aufgrund der sehr großen Masse der Erde ist die Geschwindigkeit v_k entsprechend klein und nicht messbar. Das bedeutet: Da bei der Beobachtung des Phänomens die Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel v_G größer ist als die der einlaufenden Kugel v_S , hat die gestoßene Kugel einen zusätzlichen Impuls von der Erde erhalten. Der Impuls ist nicht erhalten, so lange die Erde nicht in die Betrachtung mit einbezogen wird.

⁸Die Kugeln wechselwirken über die Bahn, die mit der Erde fest verbunden ist, indirekt mit der Erde.

6.5. Erfahrungen mit Studierenden

Zu dem Zeitpunkt, als das Phänomen zum ersten Mal in einem Seminar durchgeführt wurde, hatte ich bereits einen großen Überblick über das „Umfeld“ des Phänomens. Nun war es an der Zeit, Studierende mit diesem Phänomen experimentieren zu lassen.

6.5.1. Vorführung des Phänomens

Die Vorführung des Phänomens gestaltete sich folgendermaßen: Die Kugelskette inklusive magnetischer Kugel liegt auf der Messingbahn. Ich benutzte eine Anordnung mit 9 Kugeln inklusive magnetischer Kugel. Der Stoß läuft von links nach rechts ab, und die magnetische Kugel befindet sich der zweiten Position von links in der Kugelskette. Ich führte das Experiment vor, indem ich eine Kugel auf die Kette zurollen ließ. Dabei versuchte ich einerseits, die Geschwindigkeit der einlaufenden Kugel nicht zu groß zu wählen, andererseits sollte sie auch nicht zu klein ausfallen, da dann die beschleunigende Wirkung des Magneten besonders auffällig ist. Bei zu großen Geschwindigkeiten der einlaufenden Kugel ist das Phänomen nicht, oder nur schwer, zu erkennen. Wählt man eine zu kleine Geschwindigkeit, so wird auf den ersten Blick erkennbar, dass sich ein Magnet in der Kugelskette befindet.

6.5.2. Fragestellungen

Es zeigte sich praktisch in allen Fällen, dass auch die Studierenden das Phänomen der „Geschwindigkeitserhöhung“ beim Stoß der Kugeln als auffällig empfinden. Mittlerweile habe ich auch nach vielen Vorführungen Übung darin, die „ideale“ Einlaufgeschwindigkeit zu wählen, damit das Phänomen besonders deutlich wird. So konzentrierte man sich schnell auf diesen Aspekt. Ich übergab⁹ daraufhin den Aufbau den Studierenden, die sofort mit eigenen Stoßversuchen begannen. Im Allgemeinen war sehr schnell klar, dass sich in der Bahn mindestens eine magnetische Kugel befindet. Allerdings hat dies nur eine Gruppe systematisch durch ein kleines Experiment überprüft, indem sie jede Kugel einzeln in die Nähe eines Eisenstabs gebracht hat. Die magnetische Kugel und der Stab zogen sich gegenseitig an, während alle anderen Kugeln keine Wechselwirkung mit dem Stab zeigten. Am Ende kristallisierten sich in der Regel folgende Hauptfragestellungen heraus:

1. Hängt das Phänomen der Geschwindigkeitserhöhung von den Kugeln ab (Masse, Größe und Material)?
2. Welche Rolle spielt der Energie- und Impulserhaltungssatz bei diesem Phänomen?
3. Welchen Einfluss hat die Rollbahn auf das Phänomen (Abmessungen und Material)?
4. Welchen Einfluss hat der Magnet auf das Phänomen (Anzahl und Größe)?

Zunächst wurde das Experiment mit verschiedenen Arten von Kugeln (z.B. Holz) wiederholt. Da bei nicht magnetischen Kugeln keine Erhöhung der Geschwindigkeit beobachtet werden konnte, schlussfolgerte man daraus, dass der Magnet im wesentlichen für die erhöhte Geschwindigkeit nach dem Stoß verantwortlich ist.

⁹In der Regel führe ich das Phänomen zwei bis dreimal selbst vor und frage die Studierenden dann, was ihnen aufgefallen ist, bevor ich es ihnen übergebe.

Die für alle Teilnehmer naheliegenste Abwandlung des Experiments bestand darin, die Position der magnetischen Kugel in der Kette zu variieren und dabei die Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel zu untersuchen. Dabei handelte es sich in allen Fällen um qualitative Analysen (Hinschauen). Am Ende dieser Phase standen im Wesentlichen bei allen Gruppen Fragen über Energie- und Impulserhaltung in erster Stelle. Es gibt jedoch auch Ausnahmen. Im Gegensatz zu allen anderen Gruppen untersuchte eine Gruppe das Verhalten der magnetischen Kugel genauer. Sie ließen die magnetische Kugel zunächst auf der ebenen Bahn rollen.

6.5.3. Untersuchung der Energie- und Impulserhaltung

Interessanterweise wird von Studierenden in manchen Fällen (zumindest zu Beginn ihrer Untersuchungen) kein Widerspruch zur Energie- oder Impulserhaltung gesehen. Im Falle der Impulserhaltung ist dieser Sachverhalt für mich noch nachvollziehbar, da auch ich zu Beginn meiner Auseinandersetzungen mit dem Phänomen deutliche Fehlvorstellungen im Zusammenhang mit Rolle des Impulses hatte. Im Falle der Energieerhaltung war ich doch ein wenig überrascht.

Studierende:

Die Energieerhaltung ist nicht verletzt, da die stoßende Kugel kurz vor dem Stoß durch den Magneten beschleunigt wird und die gestoßene Kugel sich mit der entsprechend höheren Geschwindigkeit von der Kette löst. Die zusätzliche Energie kommt vom Magneten her.

In dieser oder in einer ähnlichen Weise wurde zunächst von vielen Seminarteilnehmern argumentiert. Dabei wird zunächst davon ausgegangen, dass der Kugel durch den Magneten Energie zugeführt wird. Woher jedoch der Magnet diese Energie bekommen hat, wird in den meisten Fällen nicht näher thematisiert. Oft begnügt man sich damit, dass die Energie „irgendwie aus dem Magnetfeld kommt“. Es wurden daraufhin vielfach Untersuchungen angestrebt, diese zusätzliche Energie quantitativ zu bestimmen. Dazu wurden die Geschwindigkeiten der Kugeln näher untersucht. Das Ziel war, Aussagen über die kinetischen Energien der Kugeln zu erhalten. Während in vielen Fällen die Geschwindigkeit der Kugeln mittels Lichtschranken vermessen wurde, gab es auch andere interessante Lösungsansätze:

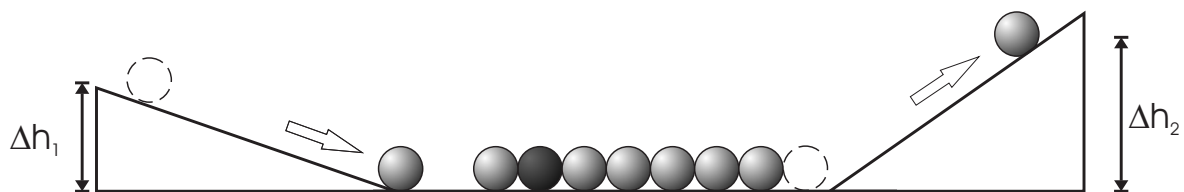


Abbildung 6.14.: Zur Bestimmung der kinetischen Energie der gestoßenen Kugel. Die einlaufende Kugel läuft aus einer festen Höhe Δh_1 eine schiefe Ebene herunter, und die gestoßene Kugel läuft eine schiefe Ebene herauf. Die Höhe Δh_2 , die die gestoßene Kugel dabei erreicht, ist ein Maß für ihre kinetische Energie.

Das Ziel war einerseits, eine reproduzierbare Geschwindigkeit der einlaufenden Kugel zu erhalten und andererseits, die kinetische Energie der gestoßenen Kugel zu bestimmen. Rollt die einlaufende Kugel eine schiefe Ebene herunter, so gilt $\Delta E_{kin} = -\Delta E_{pot}$. Da sich die potentielle Energie sehr leicht messen lässt (da $E_{pot} \sim \Delta h$), wurde ein Aufbau mit zwei gegenläufigen

schiefen Ebenen erstellt. Die stoßende Kugel rollt die erste Ebene herunter und hat am tiefsten Punkt eine reproduzierbare Stoßgeschwindigkeit, die mit ihrer Starthöhe zusammenhängt. Ihre Geschwindigkeit ist gegeben durch $v_S = \sqrt{2g\Delta h_1}$ ¹⁰ Nach dem Stoß rollt die gestoßene Kugel eine gegenläufige schiefe Ebene wieder hinauf und ihre Geschwindigkeit am untersten Punkt hängt mit ihrer maximal erreichten Höhe zusammen. Wie bereits erwähnt, wurden die Geschwindigkeiten der Kugeln in den meisten Fällen mittels eines Aufbaus mit Lichtschranken gemessen.

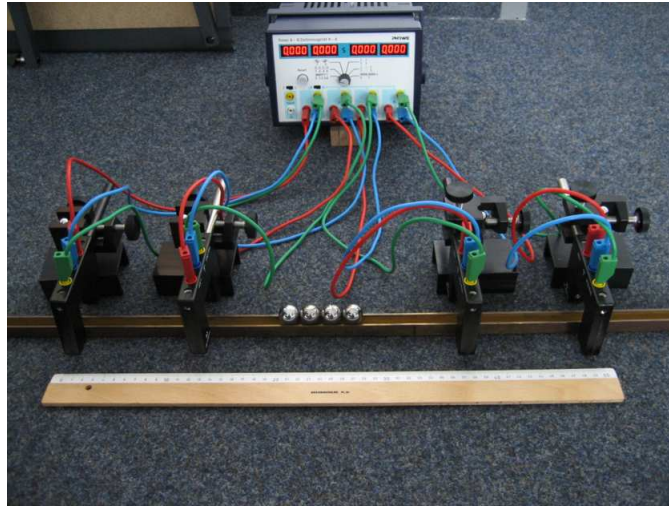


Abbildung 6.15.: Typischer experimenteller Aufbau zur Vermessung der Geschwindigkeiten der stoßenden Kugeln mittels Lichtschranken. Es wurde die Zeit gemessen, die die Kugeln zum Durchlaufen einer bestimmten Strecke benötigen.

Die Geschwindigkeit der stoßenden und der gestoßenen Kugel konnten von den Seminarteilnehmern durch Messung der Zeit bestimmt werden, die die Kugeln zum Durchlaufen einer vorher definierten Strecke benötigen, wobei sie die Geschwindigkeiten der Kugeln während der Rollbewegung als konstant voraussetzten. Die gewonnenen Daten wurden in den meisten Fällen in Form von Tabellen ausgewertet. Eine der Gruppen wählte für die Darstellung ihrer Daten eine grafische Variante. Nachdem sie die Geschwindigkeiten v_S und v_G bestimmten, wurde das Verhältnis v_G/v_S gegen v_S aufgetragen. Ich konnte bereits (für mich selbst) vorhersagen, wie die Darstellung aussehen wird. Wir nehmen Gleichung (6.14) für den Spezialfall $\frac{2\beta}{m}(\beta^2 E_{mag} - E'_{mag}) = \alpha > 0$, so können wir schreiben:

$$\frac{v_G}{v_S} = \frac{\sqrt{\alpha + \beta^2 v_S^2}}{v_S} \quad (6.21)$$

Für kleine Geschwindigkeiten, also für $\alpha \gg \beta^2 v_S^2$ geht (6.21) über in $v_G/v_S = \sqrt{\alpha}/v_S$. Dies entspricht einer Hyperbel, deren Krümmung durch α festgelegt wird. Für große Werte von v_S kann α in (6.21) vernachlässigt werden. In diesem Fall gilt:

$$\lim_{v_S \rightarrow \infty} \frac{v_G}{v_S} = \beta \quad (6.22)$$

¹⁰Die Tatsache, dass im System auch Rotationsenergie enthalten ist, blieb in diesem Zusammenhang von den Studierenden unberücksichtigt.

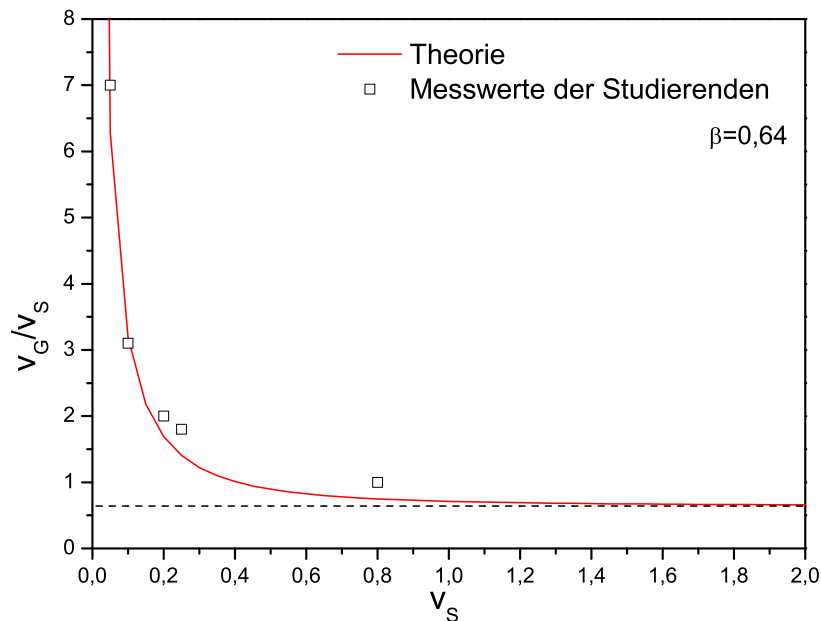


Abbildung 6.16.: Darstellung der Geschwindigkeitsmessung der Kugeln einer Gruppe von Studierenden. Die theoretische Anpassung durch Gleichung (6.14) (durchgezogene Linie) wurde nachträglich von mir vorgenommen. Auch dieser Darstellung (vgl. Abb. 6.8 und 6.12) kann man entnehmen, dass das Phänomen bei großen Geschwindigkeiten v_S nicht mehr zu erkennen ist, da v_G in diesem Fall nahezu unabhängig und kleiner als v_S ist.

Die Funktion nähert sich dann asymptotisch an den Wert $\beta = 0,64$ an. In Abbildung 6.16 werden die Messdaten der Studierenden in der entsprechenden Auftragung dargestellt. Die Besonderheit bei dieser Vorgehensweise bestand darin, dass die Gruppe dem Diagramm entnehmen konnte, dass das Phänomen nur bei kleinen Geschwindigkeiten v_S auftaucht.

Studierende:

Des weiteren ist auffällig, dass die Messpunkte bei entsprechend großem v_S gegen 1 gehen. Das heißt, dass bei einer hohen Geschwindigkeit der einrollenden Kugel der beschleunigende Effekt der magnetischen Kugel keine große Rolle mehr spielt.[...] Sie wird zwar immer noch beschleunigt, diese wird aber durch Reibung mit der Bahn kompensiert. Da unter normalen Umständen $v_G < v_S$ sein müsste, bei einem Verhältnis von 1 jedoch beide Geschwindigkeiten gleich groß sind.

Die wesentliche Aussage der Darstellung wird richtig erkannt. Allerdings vermuten sie eine asymptotische Näherung an den Wert 1, was zwar falsch ist, jedoch durch Zugrundelegung ihrer Messdaten eine nachvollziehbare Extrapolation darstellt. Auch hier existiert (wie in praktisch allen Fällen) die Vorstellung, dass unter „normalen“ Umständen, also ohne Magnet, die Geschwindigkeiten unter allen Umständen gleich groß sein müssen.

6.5.3.1. Ergebnisse zur Energie

In praktisch allen Fällen wird die Abhängigkeit der Geschwindigkeiten der Kugel von der Position des Magneten innerhalb der Kugelskette untersucht. Diese Untersuchungen führen im Wesentlichen auf Vorstellungen, die mit denen von mir in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen vergleichbar sind.

Studierende:

Die Kugel gewinnt kinetische Energie im magnetischen Feld bei Annäherung an den Magneten. [...] Die Energie der letzten Kugel reicht dann im günstigsten Fall aus, um das magnetische Potential (auf der anderen Seite) zu überwinden.

Hier bleibt jedoch noch eine wichtige Frage unbeantwortet, nämlich woher der Magnet diese Energie bekommt. Es zeigt sich immer wieder, dass den Seminarteilnehmern eine Antwort auf gerade diese Frage besonders schwer fällt. Eine Antwort ist beispielsweise diese:

Studierende:

Je näher die Stahlkugel dem Magneten kommt, desto stärker wird sie magnetisiert und desto mehr (potentielle) Energie erhält sie von dem Magneten [...]

Offensichtlich fällt es den Teilnehmern schwer einzuordnen, ob der Magnet, das Magnetfeld oder die Kugeln Energie bekommen oder abgeben. Ein weiterer Hinweis darauf, dass eindeutige Sprechweisen (des Lehrenden) und konsistente Begriffsbildungen hier unerlässlich sind.

6.5.3.2. Die Rolle des Impulses

Wie bereits erwähnt, wird von den meisten Gruppen kein Problem im Zusammenhang mit der Impulserhaltung gesehen. Dies überrascht mich jedoch keineswegs, denn erstens habe auch ich zu Beginn meiner Untersuchungen kein Problem mit der Impulserhaltung gesehen und zweitens setzt eine genaue Betrachtung der Rolle des Impulses einen gewissen „Überblick“ über das Phänomen voraus. Beispielsweise müssen bestimmte Vorstellungen über die Rolle von Reibung und über die Rollbewegung bekannt sein. Es wird in den meisten Fällen in folgender Weise argumentiert:

Studierende:

Trotz der Veränderung des Impulses durch den Magneten, [...] ist immer noch eine Impulserhaltung vorhanden, nur nicht im Sinne von Impuls vor dem Stoß ist gleich Impuls nach dem Stoß. [...] Die Kugel wird durch den Magneten beschleunigt und erhält dadurch einen größeren Impuls, den sie dann gemäß der Impulserhaltung an die letzte Kugel abgibt. Also bleibt die Impulserhaltung bestehen.

Offenbar wird die Impulserhaltung nur sehr lokal betrachtet, nämlich unmittelbar vor und nach dem Stoß. Diese Sichtweise ist ähnlich eingeschränkt, wie bei der Betrachtung der Energie. Die Frage, woher der zusätzliche Impuls kommt wird im Allgemeinen genauso beantwortet, wie die Frage, woher die zusätzliche Energie kommt. Die Antwort fällt den meisten Studierenden leicht: „Beides kommt vom Magneten her.“

6.5.4. Rollen auf unterschiedlichen Bahnen

Inwieweit hängt das Phänomen der Geschwindigkeiterhöhung von Breite und Material der Bahn ab? Diese Frage stellte sich in vielen Fällen bereits in einem sehr frühen Stadium der Untersuchungen vieler Gruppen. Im Abschnitt 6.4.2 wurde bereits gezeigt, dass die Breite der Bahn (im Fall rotierender Kugeln) einen erheblichen Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhältnis v_G/v_S hat. Nach meiner Erfahrung treten an diesem Punkt unterschiedliche Fälle auf.

1. *Im Experiment wird keine Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverhältnisses v_G/v_S von der Breite d der Bahn beobachtet.* Das kann einerseits daher kommen, dass man keine Abhängigkeit erwartet, andererseits aber auch daher, dass nur wenige, in der Breite unterschiedliche Bahnen zur Verfügung standen.
2. *Im Experiment wird keine Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverhältnisses v_G/v_S vom Material der Bahn beobachtet.* Dieser Fall tritt im Allgemeinen immer auf. In der Regel wurden weitere Bahnen aus Kunststoff verwendet.
3. *Im Experiment ohne Magnet beobachtet man, dass das Geschwindigkeitsverhältnis v_G/v_S kleiner als eins ist.* Diese Beobachtung wurde ebenfalls von vielen Gruppen (oft zufällig¹¹) gemacht. Dieser Sachverhalt wurde sehr schnell mit Hilfe von Reibung begründet und wurde dadurch für die weitere Betrachtung uninteressant. „Die Kugel ist hinten langsamer als vorne, weil es Reibung gibt.“ Die Frage, wie denn dann die Abhängigkeit von v_G/v_S von d mit Reibung erklärt werden kann und muss, blieb offen.

6.5.5. Wirbelströme

Manchmal gibt es auch Fälle, bei denen die Untersuchungen plötzlich in eine völlig andere Richtung gehen, die manchmal kaum vorhersehbar ist und bei der das eigentliche Ausgangsphänomen für die Seminarteilnehmer keine Bedeutung mehr spielt. Auf das Untersuchungsfeld, welches ich im Folgenden beschreibe, wurde auch ich erst durch Anregungen von Studierenden aufmerksam:

Bei den Untersuchungen der Studierenden kann es dazu kommen, dass sie die magnetische Kugel alleine auf der Metallbahn rollen lassen. Genau dies tat z.B. eine Gruppe, die Stoßversuche mit der magnetischen Kugel als „einlaufende“ Kugel durchführte. Dabei stellten sie fest:

Studierende: Die magnetische Kugel rollt ja viel schlechter als die anderen.

Zunächst war überhaupt nicht klar, welche Parameter für die bremsende Wirkung verantwortlich sein könnten. Zunächst wurden ausschließlich äußere Umstände vermutet wie: Erdmagnetfeld, der Einfluss von Metallen im Boden und Tisch oder in der Umgebung. Diese Vermutungen stellen sich als überhaupt nicht abwegig heraus, denn Experimente zeigten eine Abhängigkeit des Verhaltens der Kugel vom Untergrund (Tisch oder Fußboden). Die Feldstärke der Kugel ist so hoch, dass Metallteile, die sich in der näheren Umgebung befinden, das Rollverhalten beeinflussen können. Daher wurde der Versuch außerhalb des Gebäudes mit einer Messing und einer Kunststoffbahn wiederholt. Um den Einfluss des Erdmagnetfeldes zu untersuchen, wurden

¹¹Das kommt daher, dass dieser Effekt mit dem bloßen Auge praktisch nicht zu beobachten ist. Man muss schon „messen“ um ihn zu erkennen.

zunächst die Pole der Kugel farblich gekennzeichnet. Die Frage lautete:

Studierende: Richtet sich die Kugel wie ein Kompass entsprechend dem Erdmagnetfeld aus?

Im ersten Versuch wurde die Kugel auf den Boden gelegt und mit einer Kompassnadel verglichen. Es war kein Zusammenhang festzustellen. Um sicherzustellen, dass der Effekt nicht durch Reibung zerstört wird, wurde die Kugel auf Styropor in eine Wasserschale gelegt. In diesem Fall war eine eindeutige Ausrichtung der Kugel zu beobachten.

Offenbar können auch hier in diesem Untersuchungsfeld eine Reihe von Effekten eine Rolle spielen. Es gilt daher zu untersuchen, welche davon wesentlich sind und welche nicht. Einen deutlichen Hinweis findet man, wenn man die magnetische Kugel auf unterschiedlichen Rollbahnmaterialien (Metall/Kunststoff) rollen lässt. Die magnetische Kugel wird nämlich ausschließlich auf der Metallbahn gebremst. Auf der Kunststoffbahn unterscheidet sich das Rollverhalten der magnetischen Kugel nicht von dem der anderen. Die metallische Struktur der Bahn liefert demnach einen notwendigen Beitrag.

Wenn die magnetische Kugel auf der Metallbahn rollt, dann bewegt sich auch das Magnetfeld mit ihr über die Bahn. Ein sich änderndes Magnetfeld sorgt nach dem Induktionsgesetz in einem Leiter für einen Induktionsstrom. Daher fließen in einer Umgebung der Kugel in der Metallbahn Kreisströme, so genannte Wirbelströme, die ihrerseits wiederum ein Magnetfeld induzieren, welches mit dem Magnetfeld der Kugel wechselwirkt. Beide Magnetfelder sind aus energetischen Gründen entgegengesetzt gerichtet, wodurch die bremsende Wirkung hervorgerufen wird. In der Kunststoffbahn werden keine Wirbelströme induziert, und somit wird die magnetische Kugel nicht gebremst. Ein ähnliches, aber deutlich bekannteres Experiment besteht darin, einen Magneten durch ein Metallrohr fallen zu lassen. Aufgrund der Wirbelströme im Rohr und der daraus resultierenden bremsenden Wirkung fällt die Kugel nur sehr langsam durch das Rohr nach unten.

6.5.6. Liste der von mir bereitgehaltenen Materialien

Im Laufe meiner ausführlichen Auseinandersetzung mit dem Phänomen erstellte ich folgende Liste von Materialien, die bei Untersuchungen an und mit diesem Phänomen vorrätig sein sollten:

1. Kugeln unterschiedlicher Größe und aus unterschiedlichen Materialien,
2. U-Profil Bahnen verschiedener Breite aus unterschiedlichen Materialien,
3. Zeitmessgerät und Lichtschranken beispielsweise zur Geschwindigkeitsmessung,
4. diverses Stativmaterial,
5. Videokamera und Laptop mit VIANA [46]-Software zur Bewegungsanalyse,
6. Kraftmesser mit verschiedenen Messbereichen ,
7. Kompass-Nadeln um Magnetfelder qualitativ zu vermessen,
8. Hall-Sonden verbunden mit dem computerunterstützten Messsystem CASSY, um Magnetfelder quantitativ zu vermessen,

9. Verschiedene Magnete, darunter Standardtypen und einige besonders starke NdFeB-Magnete,
10. ein „Klick-Klack“,
11. Ein Verschiebereiter (siehe Abb. 6.11).
12. Ein Aluminium-Rohr für Fallversuche mit einer magnetischen Kugel

6.5.7. Übersicht über die Aspekte des Phänomens

An dieser Stelle sind noch einmal alle Aspekte zusammengefasst, die das Phänomen „Magnet-Kugelmagnetkette“ bietet und welche davon von den Studierenden untersucht wurden.

Aspekt des Phänomens	wurde näher untersucht
Positionveränderung des Magneten in Kugelmagnetkette	ja
Kugeln unterschiedlicher Materialien und Radien	ja
Energieerhaltung	ja
Impulserhaltung	teilweise
Geometrie der Bahn	teilweise
Bahnen aus unterschiedlichen Materialien	teilweise
Einfluss der Rollbewegung	nein
Geschwindigkeitsabhängigkeit des Phänomens	einmal
Magnetkugel rollen lassen	teilweise
Wirbelstromeffekte der Magnetkugel	einmal

Tabelle 6.1.: Zusammenstellung aller Aspekte des Phänomens „Magnet-Kugelmagnetkette“, die von den Seminarteilnehmern beobachtet und untersucht *werden können* bzw. beobachtet und untersucht *wurden*.

6.6. Fazit

Die Tatsache, dass das Phänomen „Magnet-Kugelmagnetkette“ einen so einfachen Aufbau besitzt, einen scheinbaren Konflikt mit elementaren physikalischen Sätzen darstellt und dass es darüber hinaus auch Untersuchungen in völlig neue Richtungen ermöglicht, machen es zu einem geeigneten Kandidaten für eine offene experimentelle Arbeitsweise. Es zeigte sich bei meinen Beobachtungen, dass in der Praxis so „einfache“ Sätze wie Energie- oder Impulserhaltung durchaus nicht trivial anzuwenden sind. Das zeigt sich sowohl bei den Studierenden, aber auch (und das ist möglicherweise noch viel wichtiger) bei mir selbst und bei ausgebildeten Lehrern. Viele (auch einfache) Zusammenhänge (z.B. Impulsdiskussion) können im Zusammenhang mit diesem Phänomen nur von einem gewissen höheren Standpunkt aus richtig verstanden werden. Dennoch sind auch befriedigende Erklärungsansätze auf niedrigeren Niveaus möglich (z.B. einfache Energiediskussion), bei denen der Experimentator auch ohne tieferen theoretischen Einstieg Antworten auf seine Fragen bekommen kann.

Ich habe das Phänomen mit Studierenden der Sekundarstufe I und II durchgeführt. Bei der Wahl ihrer Untersuchungsmethoden und Zielen waren zwischen beiden Gruppen (Sek.1/Sek.2) keine nennenswerten Unterschiede erkennbar.

Der Blick ins Weinglas

An durchsichtigen Gefäßen lassen sich bei Beleuchtung optische Erscheinungen, wie Lichtbrechungen in vielfältiger Form untersuchen. So benutzte Schön [6] in einem Schulbuch die Frage nach dem Schattenbild einer kugelförmigen Vase als Einstiegsproblem des Kapitels „Von Bildern und optischen Geräten“.

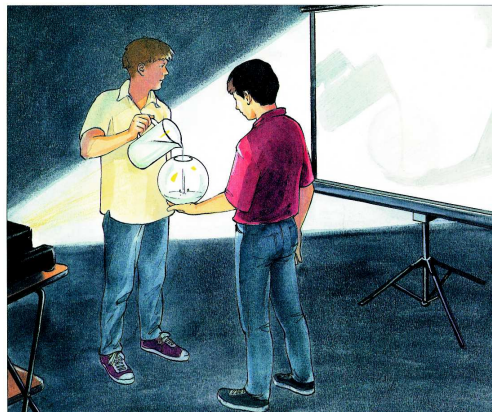


Abbildung 7.1.: Experiment zum Schattenwurf einer kugelförmigen Vase

Ein durchsichtiges leeres Glasgefäß (in diesem Fall eine Vase) wird mit einer hellen Lampe beleuchtet. Die Schüler sollen dann vorhersagen, wie sich aus ihrer Sicht der Schatten des durchsichtigen Gefäßes auf dem Schirm verändert, wenn man das Gefäß mit Wasser füllt. Es zeigt sich, dass das mit Wasser gefüllte Gefäß einen viel dunkleren oder fast schwarzen Schatten an der Wand erzeugt, obwohl das Gefäß beim Befüllen mit Wasser weiterhin durchsichtig bleibt. Benutzt man anstelle einer Vase ein Weinglas, so lässt sich ebenfalls ein dunkler Schatten an der Wand beobachten. Im Rahmen eines naturphysikalischen Seminars sollte den Teilnehmern dieser dunkle Schattenwurf an der Wand demonstriert werden. Beim Befüllen des Weinglases stellte sich jedoch heraus, dass der dunkle Schatten an der Wand von einer Vielzahl von hellen Lichterscheinungen überlagert wird. In diesem Sinne „scheiterte“ die Vorführung des dunklen Schattenbildes an der Wand, denn von den Seminarteilnehmern wurde dieser Schatten

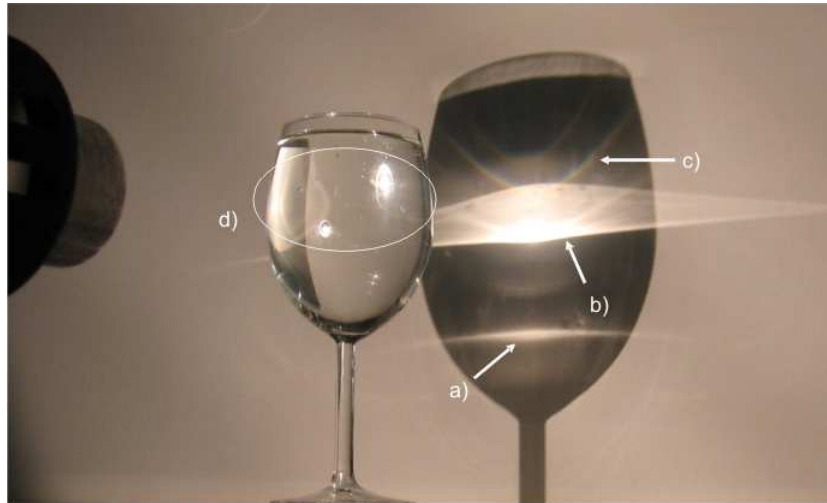


Abbildung 7.2.: Ein von hinten beleuchtetes Weinglas erzeugt einen Schatten auf der Wand, der von einer Vielzahl von Leuchterscheinungen überlagert wird. Die Punkte a) bis d) sind eine Auswahl auffälliger Phänomene.

nicht wahrgenommen. Die Aufmerksamkeit konzentrierte sich stattdessen ausschließlich auf die auffälligen Leuchterscheinungen. Es entstand eine Diskussionsrunde, in der nach Ursachen und Erklärungen für diese Leuchterscheinungen gesucht wurde. Ich war zu diesem Zeitpunkt nicht mit diesen Phänomenen vertraut und daher auf gezielte Fragen nicht ausreichend vorbereitet. An diesem Beispiel wird deutlich, dass es manchmal schwer fällt, die Aufmerksamkeit von Lernenden in eine bestimmte Richtung zu lenken. Andererseits ist man in offenen Lernsituationen bemüht, dies zu vermeiden. Aus diesem Grund könnte dieses Phänomen geeignet für eine offene experimentelle Arbeitsweise sein. In Abbildung 7.2 a) bis d) erhält man bereits einen Einblick in die Vielfalt der Aspekte, die sich dem Betrachter beim „Blick ins Weinglas“ offenbaren. Dazu gehören:

- a) Eine helle, scharf begrenzte dünne Lichtlinie im unteren Bereich des projizierten Schattens an der Wand,
- b) ein heller, breit ausgeleuchteter Bereich im mittleren bis oberen Bereich des projizierten Schattens an der Wand,
- c) bogenförmige, farbige Lichterscheinungen im oberen Bereich des projizierten Schattens an der Wand,
- d) verschiedene Lichtreflexe der Lampe auf der Glasoberfläche und im Innern des Glases.

Diese Aspekte sind nur unter bestimmten Bedingungen zu beobachten, und zwar genau dann, wenn der Abstand zwischen Glas und Schirm nicht zu groß gewählt wird. Der Grund dafür ist einfach zu verstehen: Der dunkle Schatten beim Befüllen des Glases ¹ entsteht dadurch, dass das Licht durch die mehr oder weniger kugelförmige Gestalt des mit Wasser gefüllten Glases gebündelt wird und danach divergiert. Das Licht, welches normalerweise gerade durch das Glas fallen würde, divergiert jetzt weit hinter dem Glas und leuchtet eine viel größere Fläche aus. Dadurch erscheint der Bereich, indem das Glas steht, an der Wand dunkler zu sein.

¹Im Sinne der Vorführung des Experiments von L. Schön und im Seminar.

7.1. Erste Phase eigener Untersuchungen

Die Entstehung von Schatten an der Wand ist zwar leicht zu verstehen, allerdings aber auch relativ unspektakulär. Zumindest dann, wenn man ihn zusammen mit den vielen anderen beobachtbaren Phänomenen betrachtet. So konzentrierte ich mich im Folgenden auch nicht mehr auf den Schatten, sondern auf diese Vielfalt von Leuchterscheinungen an der Wand (Abb. 7.2 a-d).

Ein Beobachter wird mit vielen Aspekten konfrontiert, die jeder für sich Gegenstand weiterer Untersuchungen sein können. Deshalb stellt das Gesamtphänomen „Blick ins Weinglas“ einen hohen Anspruch an den Experimentator. Dieser muss sich erstens für einen bestimmten Aspekt des Phänomens entscheiden und zweitens diesen Aspekt im Laufe des Experimentierens konsequent verfolgen. Dies ist jedoch insbesondere bei einem Phänomen solcher Vielfalt besonders schwierig, da zu erwarten ist, dass die verschiedenen Lichterscheinungen nicht unabhängig voneinander sind. Demzufolge war es für mich wichtig, im Laufe meiner experimentellen Tätigkeiten die folgenden Punkte nicht aus den Augen zu verlieren.

1. Welchen Aspekt des Phänomens will ich im Moment untersuchen bzw. welchen Aspekt untersuche ich gerade?
2. Von welchen Parametern hängt der zu untersuchende Aspekt ab? und
3. Phänomene treten insbesondere in diesem Beispiel nicht isoliert auf, sondern bedingen einander. Daher: Kann ich sicher sein, dass ich bei meinen Untersuchungen wirklich den Aspekt untersuche, den ich untersuchen will?

7.1.1. Untersuchung auffälliger Leuchterscheinungen auf dem Schirm

Zunächst musste untersucht werden, von welchen Parametern die beobachtbaren Aspekte abhängig sind. Am offensichtlichsten ist dabei die Abhängigkeit von der Geometrie. So untersuchte ich zunächst die Veränderung der Leuchterscheinungen bei Variation der Abstände zwischen Lampe und Glas d_{LG} und zwischen Glas und Schirm d_{GS} .

Zunächst variierte ich systematisch die Entfernung zwischen Glas und Lampe d_{LG} . Dabei blieb der Abstand zwischen Glas und Schirm konstant. Die dabei auftretende Veränderung der Leuchterscheinungen auf dem Schirm wird in Abbildung 7.3 dargestellt. Offenbar tritt in diesem Fall keine grundsätzliche Veränderung der Leuchterscheinungen auf dem Schirm auf. Man erkennt deutlich, dass es im wesentlichen drei auffällige Leuchterscheinungen gibt, deren Abstände voneinander mit zunehmendem d_{LG} immer größer werden. Diese sind der gebogene bunte Lichtbogen im oberen Bereich, ein heller breiter Lichthof im mittleren Bereich, und eine schmale kurze Lichtlinie im unteren Bereich des Glases. Anhand Abbildung 7.3 wird deutlich, dass sich der mittlere Lichthof mit zunehmendem d_{LG} praktisch nicht verändert, während der bunte Lichtbogen nach oben wandert und offenbar auch an Krümmung verliert. Die schmale Lichtlinie im unteren Bereich des Glases wandert mit zunehmendem d_{LG} ebenfalls nach oben und wird dabei schmaler oder „schärfer“.

Verändert man hingegen bei konstantem d_{LG} den Abstand zwischen Glas und Schirm, so ergibt sich ein ähnliches Bild. In diesem Fall hängt die Gestalt des Lichthofs sehr deutlich vom Abstand d_{GS} ab. Er wird immer schmaler, wenn der Abstand d_{GS} vergrößert wird. Für sehr große Abstände zieht sich dieser Bereich zu einer sehr dünnen Lichtlinie zusammen. Der obere



Abbildung 7.3.: **Variation des Abstandes d_{LG} :** Veränderung der Leuchterscheinungen bei Vergrößerung des Abstandes d_{LG} zwischen Lampe und Glas: oben links $d_{LG} = 20\text{cm}$, oben rechts $d_{LG} = 25\text{cm}$, unten Mitte $d_{LG} = 40\text{cm}$. Der Abstand zwischen Glas und Schirm beträgt in allen Fällen $d_{GS} = 25\text{cm}$.

Lichtbogen wandert nach oben und ist bei Abständen $d_{GS} > 40\text{cm}$ nicht mehr auf dem Schirm erkennbar. Die untere schmale Lichtlinie wandert mit zunehmendem d_{GS} nach unten, und nicht wie im obigen Fall (d_{GS} zunehmend) nach oben. Insgesamt lässt sich folgendes festhalten:

Bei Vergrößerung des Abstandes Lampe/Glas d_{LG}

- verändert sich der mittlere Lichthof praktisch nicht,
- wandert der obere bunte Lichtbogen weiter nach oben und verliert gleichzeitig an Krümmung,
- wandert die schmale Lichtlinie nach oben und wird dabei schmaler.

Bei Vergrößerung des Abstandes Glas/Lampe d_{GS} zeigt sich hingegen,

- dass sich der mittlere Lichthof zu einer schmalen Lichtlinie zusammenzieht,
- dass der obere bunte Lichtbogen wie im vorangehenden Fall nach oben wandert. Dabei ändert sich seine Krümmung nicht, oder zumindest nicht wahrnehmbar,
- dass die schmale Lichtlinie nicht nach oben, sondern nach unten wandert bis sie schließlich vom Schirm verschwindet.

Offenbar sind alle Aspekte von den Abständen d_{LG} und d_{GS} abhängig. Jetzt gilt es zu untersuchen, ob diese Aspekte auch voneinander abhängig sind und welche ihre Ursachen sind.

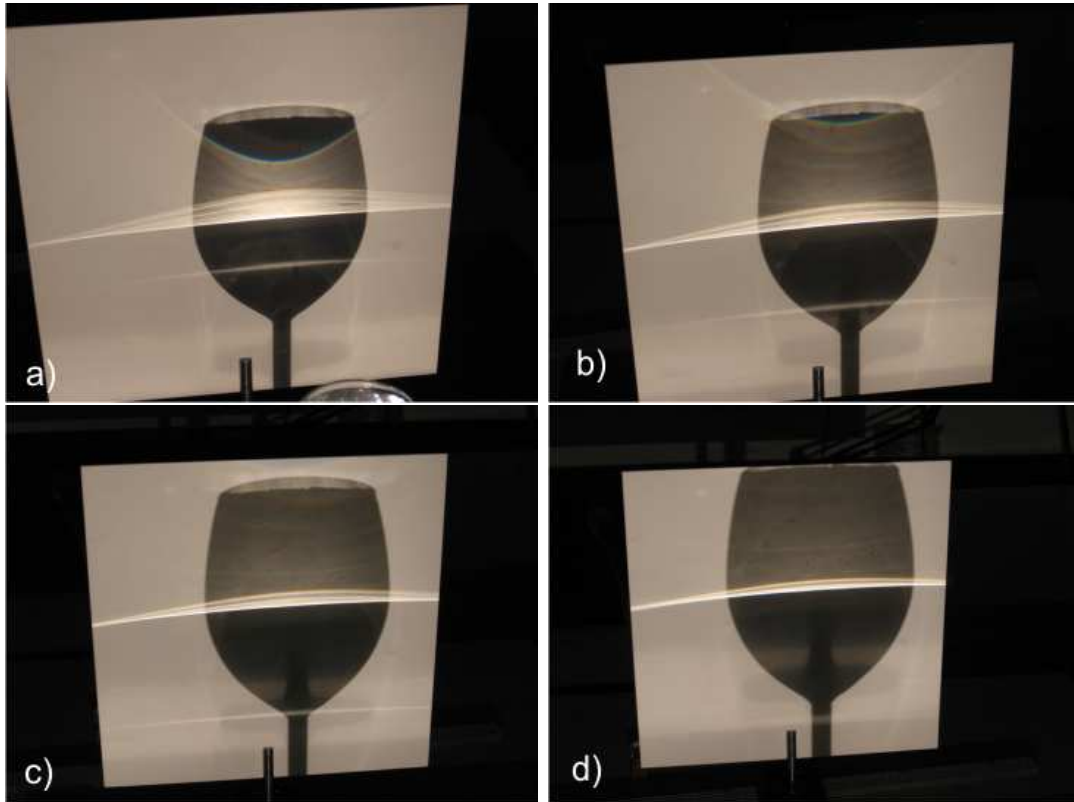


Abbildung 7.4.: **Variation des Abstandes d_{GS} :** Veränderung der Leuchterscheinungen bei Vergrößerung des Abstandes d_{GS} zwischen Glas und Schirm: a) $d_{GS} = 20\text{ cm}$; b) $d_{GS} = 30\text{ cm}$; c) $d_{GS} = 40\text{ cm}$; d) $d_{GS} = 50\text{ cm}$. Der Abstand zwischen Lampe und Glas beträgt in allen Fällen $d_{LG} = 40\text{ cm}$.

7.1.2. Untersuchung der unteren schmalen Lichtlinie

Die schmale Lichtlinie im unteren Bereich des Glases (Abb. 7.2 Punkt a) erschien mir besonders auffällig, denn sie „zitterte“ ein wenig. Bei etwas genauerem Hinsehen zeigte sich, dass leichte Erschütterungen des Glases für diese Bewegung der Lichtlinie verantwortlich sind. Selbst wenn sich eine Person durch den Raum bewegte, reichte die davon ausgehende Erschütterung des Bodens durch die Gehbewegung aus, um die Lichtlinie zu bewegen.

Die einzige Stelle im experimentellen Aufbau, die so empfindlich auf Erschütterungen reagieren kann, ist die Oberfläche des Wassers im Glas. Die Vermutung war daher, dass der Beitrag des Lichts der Lampe, der unten an der Wasseroberfläche reflektiert wird, für dieses Phänomen verantwortlich sein muss. Dies habe ich dadurch überprüft, indem ich die Reflexion nach unten durch Verwirbeln der Wasseroberfläche mit einem Stift störte. Die schmale Lichtlinie war daraufhin nicht mehr zu sehen. Sie wurde erst wieder sichtbar, als ich den Stift aus dem Glas entfernte und sich die Oberfläche wieder beruhigte. Es kann demnach festgehalten werden:

Die schmale Lichtlinie wird daher durch Lichtstrahlen gebildet, die von unten auf die Wasseroberfläche treffen und dort reflektiert werden.

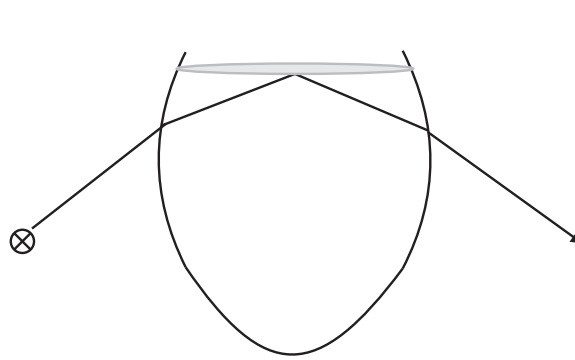


Abbildung 7.5.: Schematische Darstellung eines Lichtstrahls, der unter an der Wasseroberfläche reflektiert wird und so zu der schmalen Lichtlinie im unteren Bereich des Schirms beiträgt.

7.1.3. Untersuchung des mittleren Lichthofs

Der mittlere Lichthof (Abb. 7.2 Punkt b) ist ebenfalls sehr auffällig. Je nach Position von Glas und Schirm wird dieser Bereich entweder in Form eines breit ausgeleuchteten Lichthofes oder in Form einer sehr schmalen und hellen Lichtlinie sichtbar. Die hohe Intensität ist es, die diesen Aspekt des Phänomens so auffällig macht.

Zunächst gilt die Frage zu untersuchen, ob dieser Lichthof und die schmale Lichtlinie aus Abschnitt 7.1.2 miteinander zusammenhängen. In diesem Fall ist die Antwort besonders einfach, denn es zeigt sich zum einen, dass Erschütterungen jeglicher Art keinen Einfluss auf das Phänomen des Lichthofs haben, und zum anderen, dass selbst bei einer Ausblendung der schmalen Lichtlinie durch Störung der Wasseroberfläche der Lichthof unverändert bestehen bleibt. *Somit kann dieser ausgeleuchtete Bereich auf dem Schirm nur durch Lichtstrahlen gebildet werden, die nicht von unten auf die Wasseroberfläche treffen und dort reflektiert werden.* Dies stellt eine sehr wichtige und wertvolle Erkenntnis dar, die jedoch weiter spezifiziert werden muss, denn wir haben im Moment noch keinerlei Kenntnisse darüber, wie die Lichtstrahlen durch das Glas verlaufen, die letztendlich für den Lichthof auf dem Schirm verantwortlich sind.

Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Vorstellung darüber vorlag, wie das Licht genau durch das Glas verläuft, war es für mich sehr nahe liegend, zunächst einige andere Gefäßformen auszuprobieren. Ich ersetzte das Weinglas zunächst durch ein Zylinderglas und danach durch einen Rundkolben. Das Zylinderglas stellt im Vergleich zum Weinglas eine einfachere Form dar. Es zeigt sich, dass das Zylinderglas keinen Lichthof/Lichtlinie auf den Schirm projiziert (Abb. 7.6 links). Dies gilt für jeden beliebigen Abstand d_{GS} (falls dieser größer als die „Brennweite“ des als Zylinderlinse wirkenden Kolbens ist). Ein Zylinder besitzt für jede Höhe dieselbe Querschnittsfläche. Diese Bedingung ist beim Weinglas nicht erfüllt. Es gibt eine gewisse „Krümmung“ im unteren Bereich des Glases. Offenbar scheint diese Krümmung bzw. das Licht, welches diesen gekrümmten Bereich des Weinglases passiert, für den Lichthof verantwortlich zu sein. Verwendet man stattdessen einen Rundkolben, so entsteht ein heller Punkt an der Wand. Beide Glasarten können mit einer Linse bzw. einer Zylinderlinse verglichen werden. Welche Schlüsse kann man aus diesen Beobachtungen ziehen?

1. Der Zylinderkolben wirkt wie eine Zylinderlinse. Der Kolben fokussiert das Licht in einer (Brenn-)Linie, die auf der senkrechten z- Achse liegt. Da hinter dieser Linie Das Licht wieder divergiert, entsteht dort kein hell ausgeleuchteter Bereich

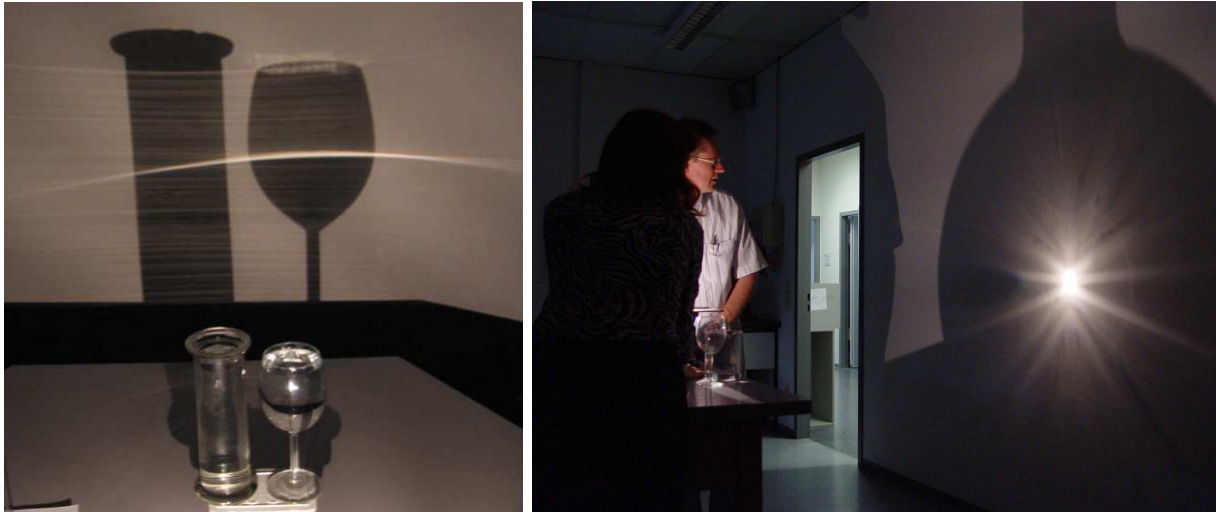


Abbildung 7.6.: **Links:** Bei einem Zylinderglas treten die Lichtlinien nicht auf.
Rechts: Ein Rundkolben erzeugt einen sehr hellen Punkt an der Wand.

2. Der Rundkolben wirkt wie eine Sammellinse. Das Licht wird in einem Brennpunkt fokussiert.
3. Das Weinglas stellt eine Mischung aus Zylinderlinse und Rundkolben dar. Der untere gekrümmte Bereich des Weinglases fokussiert das Licht in einen Punkt in z-Richtung. Die zylindrische Form sorgt gleichzeitig für eine Divergenz des Lichts, wodurch sich der Punkt zu einer horizontalen Linie verbreitert.

Nun haben wir zumindest eine qualitative Vorstellung darüber, wo der helle Lichthof bzw. die Lichtlinie ihren Ursprung haben, und können festhalten:

Der Lichthof bzw. die Lichtlinie werden durch solche Lichtstrahlen gebildet, die ausschließlich den unteren, gekrümmten Bereich des Glases passieren.

Diese Aussage sollte dadurch experimentell überprüft werden, indem einzelne Teilbereiche des Glases nacheinander mit einem Blatt Papier abgedeckt wurden (Abb. 7.7). Deckt man den oberen Bereich des Weinglases ab, so entsteht ein heller Schatten an der Wand, der sich im unteren Teil des Glases befindet². Das Papierblatt wurde nun langsam so weit nach unten verschoben, bis die nach oben wandernde Schattengrenze auf dem Schirm die helle Linie erreicht. Die Position des Papiers wird auf dem Glas markiert. Analog verfuhr ich beim Abdecken des Glases von unten. Die Schattengrenze verschiebt sich dann entsprechend von oben nach unten. Auf diese Weise erhielt ich zwei Markierungslinien, die sich im unteren gekrümmten Bereich des Glases befanden. Nur die Lichtstrahlen, die zwischen diesen Markierungen in das Glas eintraten, bildeten daher auf dem Schirm den Lichthof/die Lichtlinie aus.

Alle Untersuchungen und Experimente bis zu diesem Punkt hin hatten das Ziel, einen Zusammenhang zwischen dem Licht, welches durch das Glas läuft, und dem hellen Lichthof herzustellen. Bisher habe ich (nur) herausgefunden, an welcher Stelle der Anteil des Lichts, der für

²In Abbildung 7.7 ist dieser helle Schatten nur andeutungsweise zu erkennen. Er ist **nicht zu verwechseln** mit dem dunklen, schwarzen Schatten des Papiers im oberen Bereich des Schirms

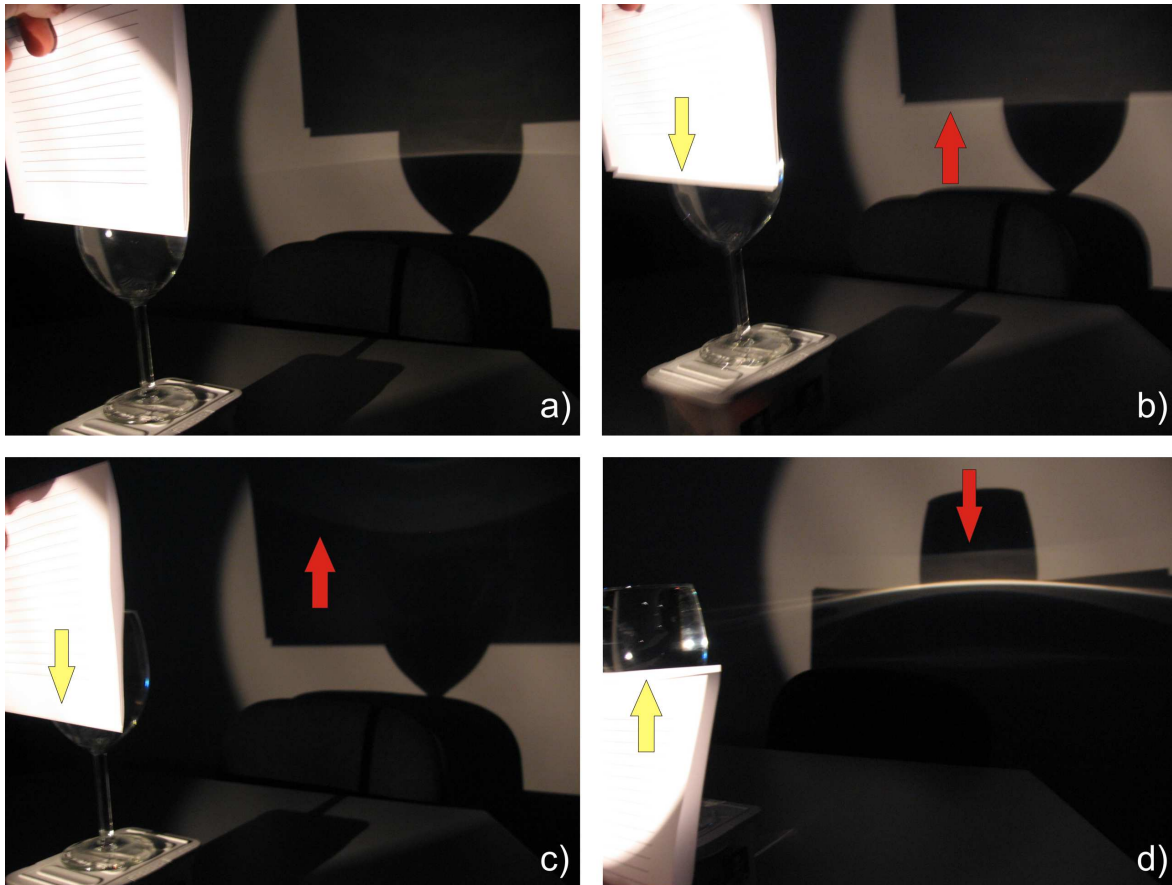


Abbildung 7.7.: Untersuchung der Lichtlinien durch Abdecken des Glases: a) Durch Abdecken des oberen Bereiches des Glases mit einem Papierblatt entsteht an der Wand im unteren Bereich ein Schatten. b) und c) Bei Verschiebung des Papiers nach unten verschiebt sich die Schattengrenze nach oben. d) Bei Abdeckung des Glases und Verschiebung nach oben verschiebt sich die Schattengrenze von oben nach unten.

diese Erscheinung verantwortlich ist, durch das Weinglas verläuft. Eine genauere Betrachtung, auf welche Weise dieses Licht durch das Weinglas verläuft, steht an dieser Stelle noch aus.

7.2. Zweite Phase eigener Untersuchungen

Der erste Einsatz des Phänomens „Blick ins Weinglas“ im Rahmen eines Seminars zeigte, dass auch nach meinen bisherigen Untersuchungen des Phänomens noch einige wichtige Fragen offen bleiben. Insbesondere waren der gekrümmte Lichtbogen im oberen Bereich des Schattenbildes (Abb. 7.2 Punkt c) und die farbige Gestalt der Lichtlinie, auf die mich die Studenten aufmerksam machten, noch nicht Gegenstand meiner Betrachtungen. Ich ging davon aus, dass genauere Kenntnisse über den Verlauf von Lichtstrahlen durch das Glas von entscheidender Bedeutung sind. So wurden alle weiterführenden Untersuchungen von der Frage geleitet:

Wie sieht der genaue Verlauf von Lichtstrahlen durch das Weinglas aus? Wie verlaufen die Lichtstrahlen nach Austritt hinter dem Glas weiter?

Ich hoffte aus den Antworten auf diese Fragen weitere, tiefer gehende Erkenntnisse über die Entstehung der verschiedenen Aspekte des Phänomens ableiten zu können. Um Antworten auf diese Fragen zu finden, bestand der erste Schritt für mich darin, den Verlauf des Lichts durch das Weinglas sichtbar zu machen.

7.2.1. Sichtbar machen des Stralengangs durch das Glas

Um den Verlauf von Lichtstrahlen durch das Glas sichtbar zu machen und somit genauer untersuchen zu können, benutzte ich einen Laserpointer. Dieser wurde mit Stativmaterial so eingespannt, dass der heraustretende Strahl genau parallel zur Tischplatte, also horizontal³ verläuft. Damit der Laserstrahl auch innerhalb des mit Wasser gefüllten Glases gut sichtbar ist, habe ich eine Prise Milchpulver hinzu gegeben. Dadurch wurde die Flüssigkeit leicht trübe und der Strahlverlauf von außen gut sichtbar. Um den Lichtstrahl auch nach dem Austritt aus dem Glas weiter verfolgen zu können, positionierte ich einen weißen Schirm so in die Austrittsebene, dass der Strahl diesen Schirm gerade noch streift. Die Situation wird in Abbildung 7.8 gezeigt. Der Laser (nicht im Bild) strahlt von links horizontal in das Glas hinein. Man erkennt deutlich den Verlauf des Lichtstrahls innerhalb der Flüssigkeit. Ein Teil des Lichts wird vor dem Austritt an der Innenseite des Glases schräg nach oben reflektiert. Es ist ebenfalls deutlich zu erkennen, dass der Strahl beim Austritt aus dem Glas gebrochen wird.

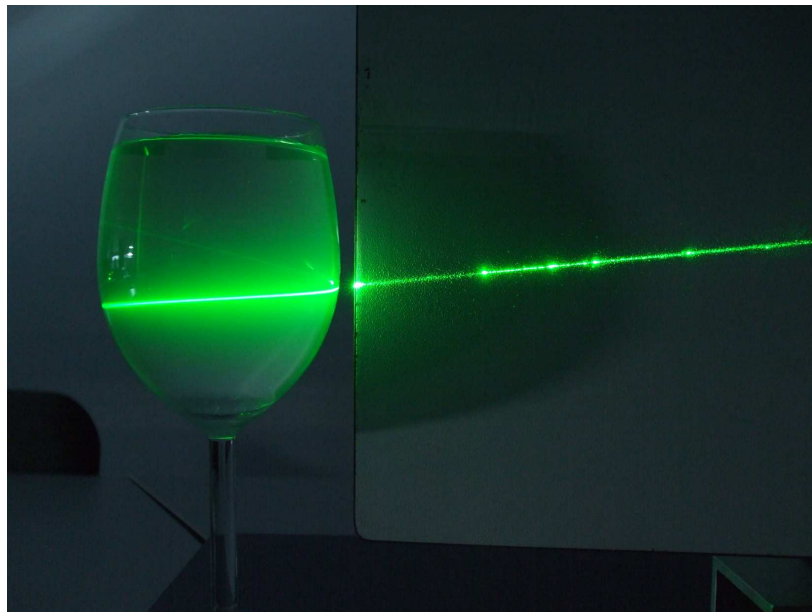


Abbildung 7.8.: Mit Hilfe eines Lasers kann der Strahlverlauf innerhalb und außerhalb des Weinglases sichtbar gemacht werden. Der einfallende Strahl verläuft horizontal.

Nun ist es leider so, dass ein solches Bild für sich alleine nur wenig Aussagekraft besitzt. Es wird nur ein bestimmter, ausgezeichneter Lichtstrahl dargestellt, dessen Verlauf man im Bild

³Ich werde damit später versuchen, Aussagen über den Spezialfall „parallel einfallendes Licht“ zu machen. Ich hoffe, dass falls sich aus diesem Experimenten weiterführende Erkenntnisse ergeben, sind diese möglicherweise auch auf allgemeinere Fälle übertragen lassen.

verfolgen kann. Ein heller Bereich auf dem Schirm, wie beispielsweise der Lichthof, den es zu untersuchen gilt, entsteht aber mit Sicherheit durch die Überlagerung von sehr vielen Lichtstrahlen. Zur Verbesserung des Experiments müssten daher mehrere Lichtstrahlen gleichzeitig dargestellt werden, die durch das Glas verlaufen. Dies kann man natürlich dadurch erreichen, indem man mehrere Laser benutzt. Diese Methode ist aber nicht sehr zweckmäßig, denn erstens stand mir nur ein einziger Laserpointer zur Verfügung und zweitens müssten dann alle Laser gleichermaßen horizontal justiert werden. So wählte ich eine andere Methode:

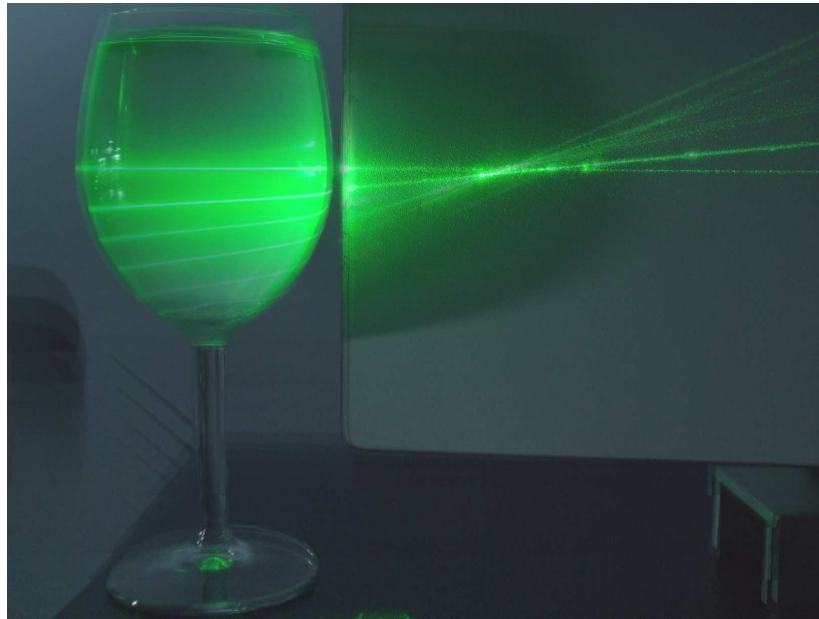


Abbildung 7.9.: Darstellung eines Strahlengangs durch ein Weinglas durch Bildüberlagerung. Dabei wurden mehrere Einzelaufnahmen, bei denen der Laser in verschiedenen Höhen auf das Glas trifft, zu einem neuen Gesamtbild überlagert.

Der Laser wurde in einer festen Höhe horizontal justiert. Das Glas befand sich auf einem Laborboy. Auf diese Weise konnte durch Höhenverstellung des Glases dafür gesorgt werden, dass der Laserstrahl in jeder beliebigen Höhe auf das Glas treffen kann. Zunächst machte ich eine Serie von Fotos (wie Abb. 7.8), bei denen ich die Höhe des Laborboys variierte. Auf diese Weise entstand ein Satz von Bildern, auf denen der Laserstrahl in unterschiedlichen Höhen auf das Glas trifft. Mit Hilfe moderner Bildbearbeitungssoftware ist es möglich, einzelne Bilder mittels Bildüberlagerung⁴ übereinander zu legen. Dabei werden zwei oder mehr Einzelbilder so übereinander gelegt, dass das darunter liegende Bild weiterhin sichtbar bleibt. Die Bilder mussten danach nur noch so positioniert werden, dass sich das Weinglas in allen Bildern genau überdeckt. Abbildung 7.9 zeigt das Ergebnis der Bildüberlagerung. Man erkennt deutlich, dass sich alle dargestellten Lichtstrahlen in einem ausgezeichneten Punkt schneiden und danach divergieren.

Beim Betrachten von Abbildung 7.9 stellte ich mir viele Fragen. Beispielsweise, welche neuen Erkenntnisse über die verschiedenen Aspekte des Phänomens man der Stahldarstellung entneh-

⁴Bei der Bildüberlagerung werden die einzelnen Bilder zunächst transparent dargestellt und dann überlagert. Die Einstellung für die Transparenz muss je nach Anzahl für jedes Bild manuell gewählt werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

men kann. Zunächst fiel mir eine Antwort auf diese Frage schwer, denn ich hatte das Gefühl, dass mich diese Darstellung letztendlich in keiner Weise weiterbringen würde. Die Lichtstrahlen divergieren, nachdem sie das Glas verlassen. Wie sollten dann Phänomene wie der helle Lichthof, die Lichtlinie oder gar der bunte Lichtbogen zu Stande kommen? Diese Fragen kann die Strahldarstellung in Abbildung 7.9 tatsächlich nicht beantworten.

Manchmal ist es sehr sinnvoll, wenn der Experimentator seine Untersuchungsergebnisse beiseite legt, sie aber dennoch im Hinterkopf behält. Es wird sich später noch herausstellen, dass sich die Darstellung in Abbildung 7.9 in einem anderen Zusammenhang als sehr nützlich erweisen wird.

Die Aussagekraft der Strahldarstellung ist deshalb so gering, weil sie nur eine kleine Auswahl von Lichtstrahlen dargestellt, die das Glas passieren. Um die Aussagekraft zu erhöhen, müssten demnach viel mehr Lichtstrahlen in einer solchen Darstellung zu sehen sein. Es müssten mindestens so viele sein, dass eine mögliche Anhäufung von gebrochenen Lichtstrahlen an bestimmten Stellen auf der Austrittsseite sichtbar gemacht werden kann. Solch eine Anhäufung, oder eine höhere Lichtstrahldichte an bestimmten Stellen entspricht einer höheren Lichtintensität an diesen Stellen.

Natürlich kann man versuchen, bei der Bildüberlagerung durch entsprechend feine Einstellung der Glashöhe, und so mit einer entsprechend größeren Zahl an Einzelbildern, die Situation in Abbildung 7.9 zu verbessern. Dies ist jedoch nicht sehr erfolgversprechend. Es können nicht beliebig viele Einzelbilder überlagert werden, da jede zusätzliche Überlagerung die Intensität des darunter befindlichen Bildes abschwächt. Am Ende werden bei zu vielen Einzelbildern, die zu unterst liegenden Bilder nicht mehr erkennbar sein. Es muss also ein völlig anderer Untersuchungsansatz gewählt werden.

Es existieren eine Reihe von Computerprogrammen zur Simulation von optischen Strahlengängen. Viele Publikationen z.B. [78] thematisieren die optischen Eigenschaften des Regenbogens und seine Entstehung mit Hilfe einer Simulation des Strahlengangs durch einen runden Wassertropfen. Eine solche Simulation könnte durch Ersetzen des „Wassertropfens“ durch ein „Weinglas“ so angepasst werden, dass sich neue Erkenntnisse gewinnen lassen.

7.2.2. Numerische Simulation des Strahlengangs

Zur Veranschaulichung und Deutung der sichtbaren Phänomene wurde eine numerische Simulation des Strahlengangs mittels Raytrace Routinen durch einen runden Wassertropfen (Abb. 7.10) modifiziert. Das „Wassertropfen“ Programm [3] berechnet ausgehend von einem festgelegtem Punkt im Raum den Verlauf von Lichtstrahlen in beliebige Raumrichtungen. Trifft ein Lichtstrahl auf den Wassertropfen, so wird seine Ablenkung gemäß des Reflexions- und Brechungsgesetzes bestimmt. Das Programm bietet die Möglichkeit, den Abstand Lichtquelle-Tropfen und Tropfen-Schirm, sowie den Brechungsindex des Tropfens auszuwählen.

Die Aufgabe bestand nun darin, den Wassertropfen durch ein Modell des Weinglases zu ersetzen. Dazu wurden die Umrisse eines Rotweinglases auf kariertes Papier übertragen. Dadurch war es möglich, das Glas in der Zeichenebene näherungsweise durch Kreise unterschiedlicher Radien zu beschreiben.

Erst später wurde das „Modell“ durch die dritte Dimension erweitert, indem die Rotations-symmetrie des Glases ausgenutzt wurde. Dabei kann man sich das Glas aus dicht übereinander liegenden Kegelstümpfe mit unterschiedlichen Radien zusammengesetzt denken (Abb. 7.11 rechts). Nun kann für jeden beliebigen Punkt P auf der Oberfläche des Glases die Ebene be-

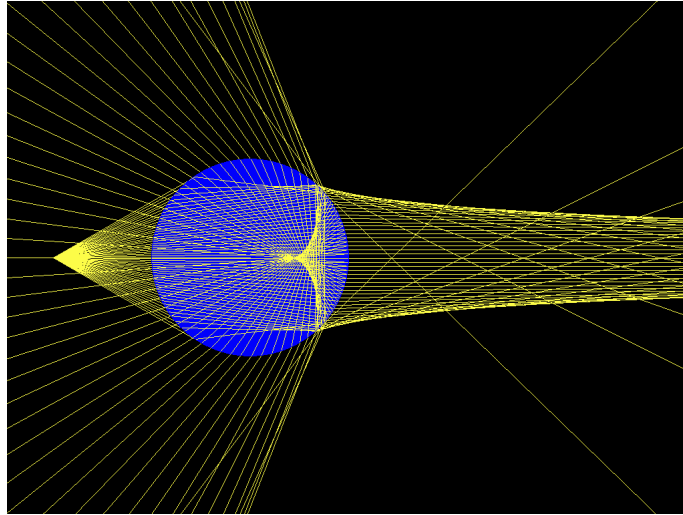


Abbildung 7.10.: Das Ausgangsprogramm „Wassertropfen“ simuliert den Strahlenverlauf an einem kugelförmigen Wassertropfen.

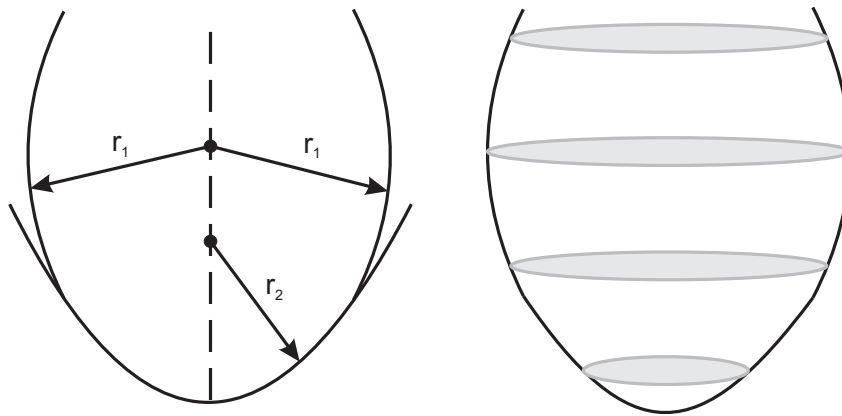


Abbildung 7.11.: **Links:** Konstruktion eines Weinglases aus Kurvenzügen unterschiedlicher Radien.
Rechts: Erweiterung der Modellbeschreibung auf drei Dimensionen.

stimmt werden, die tangential zur Glasoberfläche liegt. Der Normalenvektor dieser Tangentialebene und der Richtungsvektor des einfallenden Lichtstrahl bilden die Einfallsebene des Lichts in Punkt P . Mit Hilfe des Reflexions- und Brechungsgesetzes kann nun der weitere Verlauf des Lichtstrahls berechnet werden.

Abb. 7.12 zeigt ein Beispiel für den Verlauf des Lichts durch ein mit Wasser gefülltes Weissweinglas, dargestellt durch die Simulation [4]. Im linken Bild wird das Glas mit parallel einfallendem, und im rechten Bild mit dem Licht einer Punktlichtquelle beleuchtet. Alle Strahlen, die im Glas gebrochen werden, werden nach Verlassen des Glases **rot** dargestellt. Die Strahlen, die darüber hinaus mindestens einmal im Glas reflektiert werden, sind nach dem Verlassen des Glases **grün** dargestellt. Der Schirm befindet sich in der Simulation auf der äußersten rechten Seite des Bildes. In diesem Fall werden etwa 100 Strahlen dargestellt. Diese Menge ist ausreichend, um eine mögliche Anhäufung von Lichtstrahlen im bestimmten Bereichen des Schirms beobachten zu können. Bevor wir mit weiteren Diskussionen der Simulationsergebnisse fortfahren, sollte

Partameter	Bemerkungen
Glasart	Wahl zwischen Rotwein oder Weissweinglas
3dim	Zwei- oder Dimensionale Rechnung
Füllstand	Wasserfüllhöhe im Glas
dLampe	Abstand Punktlichtquelle-Glas
hLampe	Höhe der Lampe
dSchirm	Abstand Glas-Schirm
Reflexe	Anzahl der Reflexe im Glas
Lichtstrahlen	Anzahl der berechneten Lichtstrahlen

Tabelle 7.1.: Parameter, die bei der Simulation „Brechung im Weinglas“ variiert werden können.

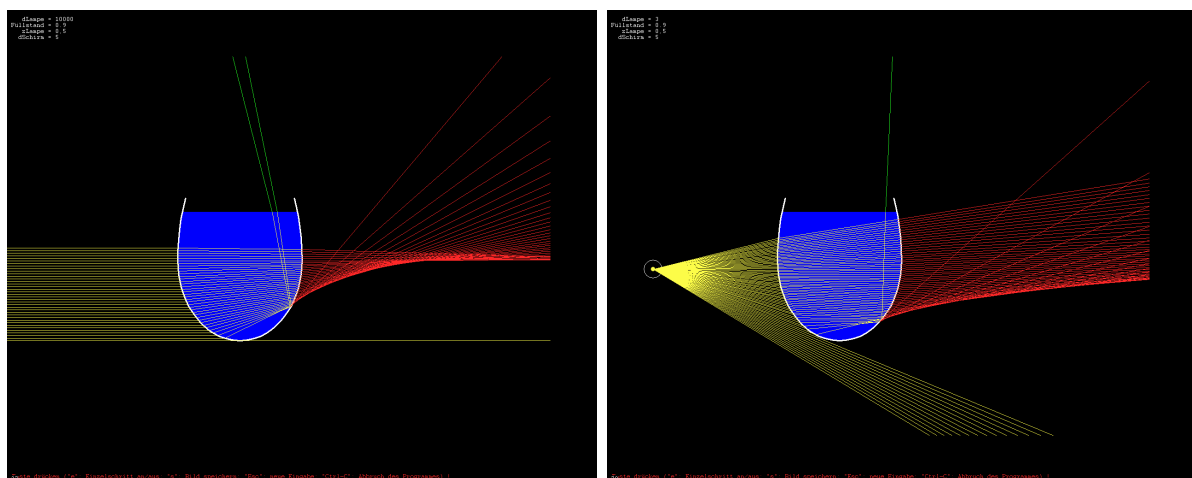


Abbildung 7.12.: **Links:** Darstellung des Strahlenverlaufs durch ein Weissweinglas mit parallel einfallendem Licht.

Rechts: Darstellung bei Beleuchtung mit einer Punktlichtquelle.

festgestellt werden, ob das in der Simulation verwendete Modell das Experiment richtig beschreibt. Für diese Überprüfung eignet sich die experimentelle Strahldarstellung in Abbildung 7.9. Wählt man in der Simulation entsprechende Parameter (Brechungsindex von Wasser, parallel einfallendes Licht und insgesamt nur wenige Lichtstrahlen), so sollte die Simulation eine entsprechende Darstellung wie Abbildung 7.9 liefern.

Vergleicht man die experimentelle und die theoretische Darstellung miteinander, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Dies gilt jedoch zunächst nur für den speziellen Fall „parallel einfallenden Lichts“. Ich gehe davon aus, dass auch der allgemeine Fall (Punktlichtquelle in beliebigen Abständen) sich mit dieser Simulation beschreiben lässt. Damit wurde sichergestellt, dass die Simulation verlässliche Vorhersagen macht, und im nächsten Schritt kann dazu übergegangen werden, die Simulation zur Deutung der verschiedenen Aspekte des Phänomens „Blick ins Weinglas“ zu verwenden. Abbildung 7.12 zeigt bereits, dass es sinnvoll oder sogar nötig ist, viele Lichtstrahlen in der Strahldarstellung zu verwenden. Die linke Darstellung in Abbildung 7.12 und die rechte Darstellung in Abbildung 7.13 sind direkt vergleichbar (beide zeigen den Fall „parallel einfallendes Licht“). In Abbildung 7.12 werden jedoch deutlich mehr Strahlen gleichzeitig dargestellt. Man erkennt in diesem Bild auf der rechten Seite des Weinglases (wo

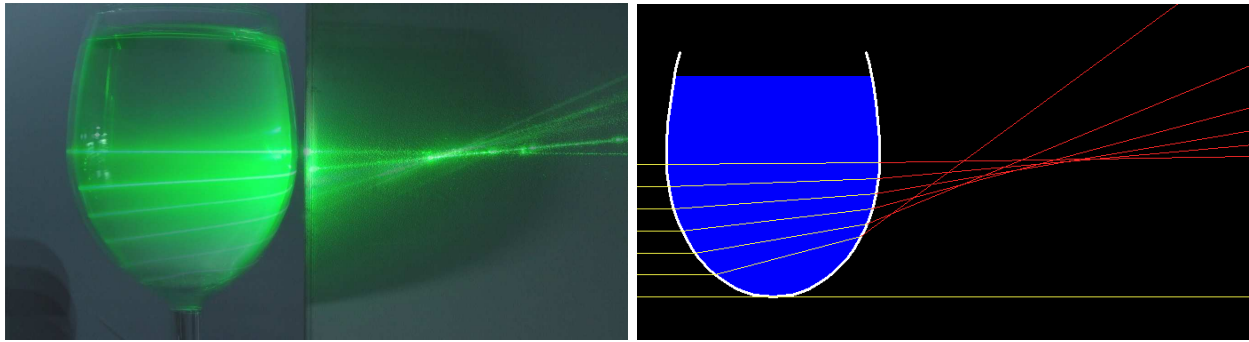


Abbildung 7.13.: Vergleich der Ergebnisse der „Weinglas-Simulation“ mit dem Realexperiment aus Abbildung 7.9. Die Vorhersagen der Simulation stimmen für den Spezialfall „parallel einfallendes Licht“ mit dem Experiment überein.

das Licht aus dem Glas austritt), dass die austretenden Lichtstrahlen (Rot) unterschiedlich dicht beieinander liegen. Offenbar wird nicht der gesamte Schirm mit Licht beleuchtet, sondern es existiert eine untere Grenze des ausgeleuchteten Bereichs. Die Umgebung dieser Grenze wird vom Beobachter aufgrund der größeren Strahldichte heller wahrgenommen als der restliche ausgeleuchtete Bereich des Schirms. In Abbildung 7.13 wird dies aufgrund der geringen Zahl dargestellter Lichtstrahlen nicht so leicht erkennbar.

7.2.3. Diskussion der Ergebnisse der Simulation

Nun soll versucht werden, mit Hilfe der Simulation die beobachteten Aspekte des Phänomens „Blick ins Weinglas“ zu verstehen. Abbildung 7.14 zeigt den simulierten Verlauf von Lichtstrahlen von der Seite aus betrachtet (links) und die zugehörigen, für einen Beobachter, aus Richtung der Lampe blickend, sichtbaren Schirmbilder. Die oberen und unteren beiden Bilder gehören paarweise zusammen. In den oberen beiden Bildern wird der Strahlverlauf durch ein Weissweinglas und in den unteren beiden Bildern durch ein Rotweinglas dargestellt. Der Verlauf der Lichtstrahlen durch die Weingläser soll nun genauer diskutiert werden:

Beide Gläser werden von einer Punktlichtquelle beleuchtet. Dieser Fall ist deutlich realistischer als der bisher betrachtete Fall parallel einfallenden Lichts, da auch im Experiment die Lampe meist nur einige Zentimeter entfernt vom Glas positioniert ist. Die von unten innerhalb des Glases auf die Wasseroberfläche treffenden und dort reflektierten (in Abb. 7.14 außerhalb des Glases grün dargestellten) Lichtstrahlen deuten auf die Entstehung eines hellen Bereiches in der unteren Hälfte des Schirmes hin. Nachdem diese Strahlen das Glas verlassen haben (sie werden an der Kante des Glases noch einmal gebrochen), verlaufen sie nach unten. In der Schirmdarstellung wird deutlich, dass diese Lichtstrahlen tatsächlich für die beobachtbare **schmale Lichtlinie** im unteren Bereich des Schirms verantwortlich sind (wie wir es uns in Abschnitt 7.1.2 bereits experimentell überlegt haben). Man erkennt, dass diese Lichtstrahlen beim Rotweinglas außerhalb des Glases **dichter zusammen verlaufen**, als beim Weißweinglas. Daraus folgt, dass die resultierende Lichtlinie auf dem Schirm beim Weißweinglas **deutlich schmaler** ist als bei dem Rotweinglas. Alle Lichtstrahlen, die im Glas gebrochen werden und nicht an der Oberfläche reflektiert werden, treffen im mittleren Bereich auf den Schirm. Diejenigen Strahlen, die das Glas weit oben dicht unterhalb der Wasseroberfläche durchlaufen, werden aufgrund der geringen Krümmung des Glases in diesem Bereich kaum gebrochen. Dies gilt sowohl für das

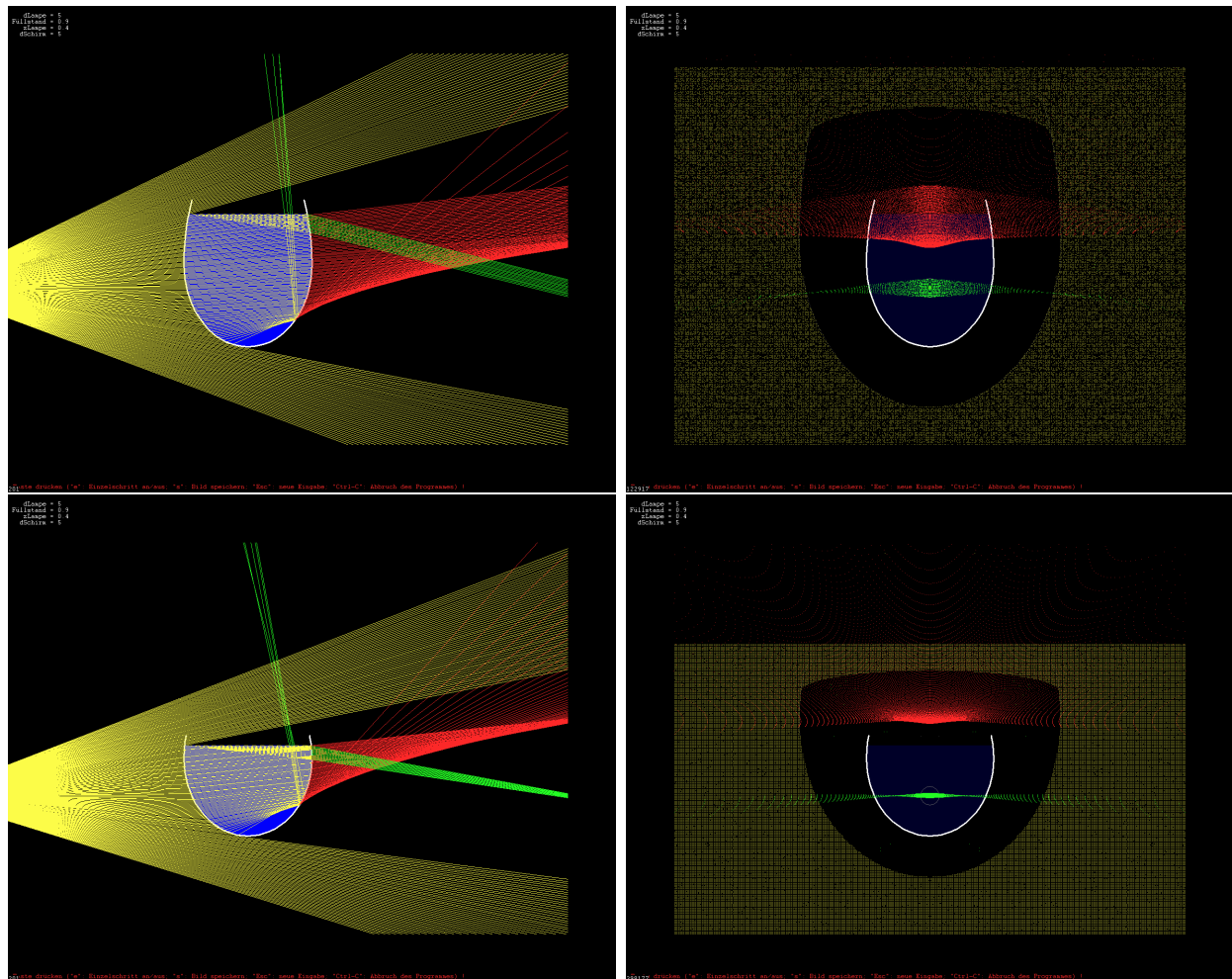


Abbildung 7.14.: **Links (Strahldarstellung):** Simulierter Verlauf der Lichtstrahlen durch ein Weißweinglas (oberes Bild) und ein Rotweinglas (unteres Bild) bei Beleuchtung mit einer Punktlichtquelle. **Rechts (Schirmdarstellung):** Das zugehörige sichtbare Schirmbild, wenn ein Betrachter aus Richtung der Lampe auf den Schirm blickt bei einem Weißweinglas (oben) und einem Rotweinglas (unten).

Rotwein- als auch für das Weissweinglas. Die einfallenden und die austretenden Lichtstrahlen haben praktisch die gleiche Steigung, sie sind lediglich aufgrund der „Dicke“ des Glases parallel zu einander verschoben.

Diese Strahlen leuchten den Schirm gleichmäßig aus. Im unteren Bereich des Glases ist die Krümmung⁵ und damit die Einfallswinkel sehr groß. Daher werden die Lichtstrahlen in diesem Bereich deutlicher abgelenkt. Alle gebrochenen Lichtstrahlen werden in Abbildung 7.14 nach Verlassen des Glases rot dargestellt. Es entsteht ein nach unten hin scharf begrenzter Bereich, indem sich in der Nähe der unteren Begrenzung eine Verdichtung von Lichtstrahlen zeigt. Dieser Bereich erscheint deshalb für einen Beobachter besonders hell. Weiter oben laufen die Lichtstrahlen auseinander, und die vom Beobachter auf dem Schirm wahrgenommene Helligkeit nimmt deshalb nach oben hin ab. In der Schirmdarstellung, wird dieser Sachverhalt deutlich

⁵Bei großer Krümmung ändert sich für zwei benachbarte Lichtstrahlen der Einfallswinkel sehr stark.

sichtbar. Ein Teil des Lichts wird von der Wasseroberfläche reflektiert und erzeugt die schmale Lichtlinie. Dieser Beitrag wird grün dargestellt.

7.2.4. Gegenüberstellung von Simulation und Experiment

Abbildung 7.13 zeigt bereits eine gute Übereinstimmung zwischen den Vorhersagen der Simulation und der experimentellen Darstellung des Strahlverlaufs. Dabei wird sich jedoch ausschließlich auf den Spezialfall parallel einfallenden Lichts beschränkt.

Es soll nun an dieser Stelle eine weitere Prüfung mit einer allgemeinen Situation erfolgen, bei der das Weinglas mit einer Punktlichtquelle beleuchtet wird. Dabei wird das gesamte sichtbare Schirmbild simuliert und (bei gleichen Versuchsparametern) mit dem im Experiment beobachtbaren Schirmbild verglichen.

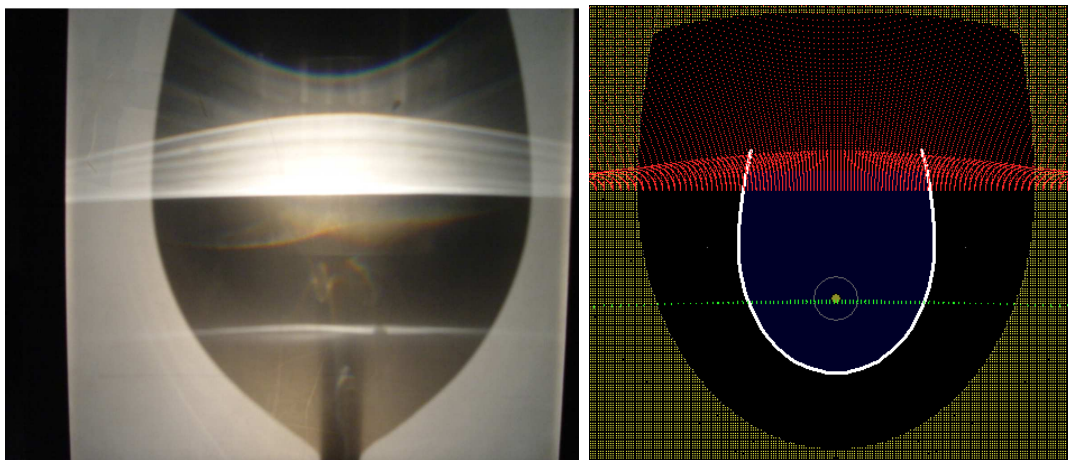


Abbildung 7.15.: Vergleich der Simulation des Schirmbildes bei Lichtbrechung in einem Weissweinglas mit dem tatsächlichen experimentellen Ergebnis. Die Parameter sind: d_{Lampe} 30cm, h_{Lampe} 0,33, L_{Schirm} 15cm

Die Übereinstimmung der simulierten Daten mit dem Experiment sind auch in diesem Fall überzeugend (Abb. 7.15), daher kann davon ausgegangen werden, dass die Simulation die sichtbaren optischen Phänomene (auch mit anderen, beliebig gewählten Parametern) richtig beschreibt.

7.2.5. Die mittlere Lichtlinie bei Rotwein- und Weissweingläsern

Vergrößert man den Abstand zwischen Glas und Schirm, so zieht sich der helle Bereich in der Mitte auf dem Schirm sowohl bei dem Rotwein-, als auch bei dem Weissweinglas zu einer Linie zusammen. Dies wird in der zweidimensionalen Ansicht in Abb. 7.16 deutlich, da der Bereich, in dem eine Verdichtung der Strahlen zu erkennen ist, mit größer werdendem Abstand immer schmäler wird und oberhalb eines gewissen *kritischen Punktes* ganz verschwindet. In diesem Punkt schneiden sich viele der aus dem Glas austretenden Lichtstrahlen, d.h. jenseits dieses Punktes laufen alle Lichtstrahlen auseinander.

Die Divergenz der Lichtstrahlen führt dazu, dass es im mittleren Bereich des Schirmbildes umso dunkler wird, je weiter sich der Schirm vom Glas entfernt. Dies gilt für das Rotwein- und das Weissweinglas gleichermaßen, wobei der kritische Punkt aufgrund der Geometrie beim Weissweinglas näher am Glas liegt als beim Rotweinglas. Im Grenzfall, wenn der Schirm sehr weit vom

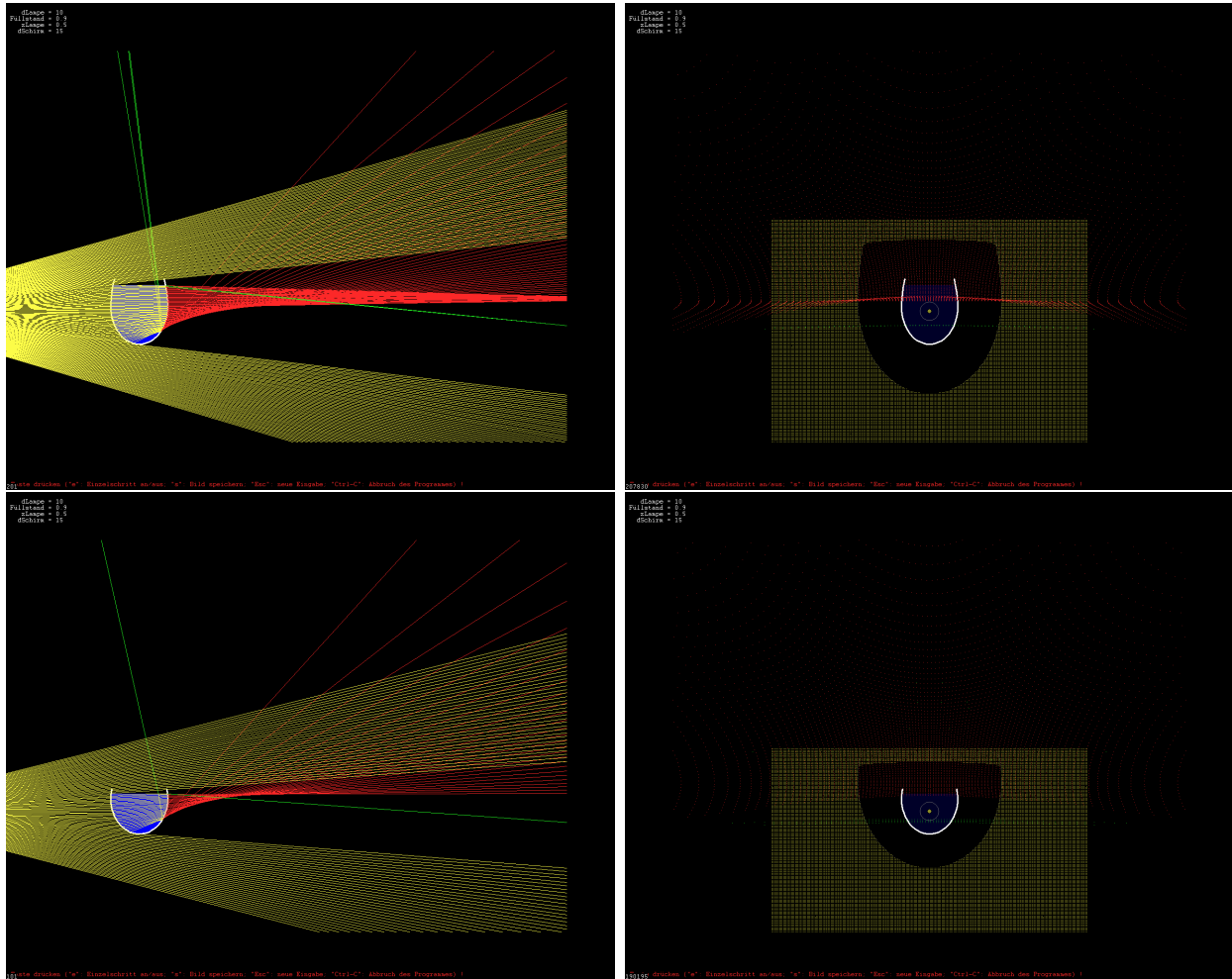


Abbildung 7.16.: Strahl- und Schirmdarstellungen bei einem Weissweinglas (oben) und einem Rotweinglas (unten). In der oberen linken Abbildung (Weißweinglas) liegt der kritische Punkt sehr weit vom Glas entfernt. Der Schirm befindet sich vom Glas aus gemessen **vor** dem kritischen Punkt. In der unteren linken Abbildung (Rotweinglas) befindet sich der kritische Punkt sehr dicht am Glas. Der Schirm befindet sich vom Glas aus gemessen **hinter** dem kritischen Punkt.

Glas entfernt ist, beobachtet man daher einen dunklen Schatten in Form des Glases auf dem Schirm. So lässt sich die Entstehung der hellen Lichtlinie im Experiment (Abb.7.19) verstehen. Der Grund, warum diese Linie bei dem Rotweinglas nicht sichtbar ist, wird in Abbildung 7.16 deutlich. Der Abstand zwischen Schirm und Glas ist in beiden Fällen gleich. Bei dem unteren Rotweinglas befindet sich der Schirm bereits rechts jenseits des kritischen Punktes (Abb. 7.16 unten). Insgesamt kann daraus geschlossen werden:

1. Die mittlere Lichtlinie ist (unabhängig von der Form des Glases) immer dann beobachtbar, wenn der Beobachtungsschirm zwischen Glas und kritischem Punkt positioniert wird.
2. Je näher der Schirm an den kritischen Punkt heranrückt, desto schmaler und heller wird die Lichtlinie. Befindet sich der Schirm rechts jenseits des kritischen Punktes, so beobachtet man einen aufgehellten, nach unten hin begrenzt ausgeleuchteten Bereich.

3. Aufgrund der Glasgeometrie ist der Abstand zwischen kritischem Punkt und Glas beim Weissweinglas größer, als beim Rotweinglas.

7.2.6. Der farbige Lichtbogen

Bei genaueren Betrachtungen der Simulationsergebnisse fiel mir auf, dass die bogenförmige Lichterscheinung in Abbildung 7.2 Punkt c) in keiner Simulationen auftritt. Das ändert sich auch dann nicht, wenn die Wellenlänge des verwendeten Lichts verändert wird. Es gibt in keiner simulierten Darstellung des Strahlengangs oder des Schirmbildes Hinweise darauf, dass eine solche Lichterscheinung entsteht. Da sie im Experiment jedoch unübersehbar ist, gibt es nur zwei Möglichkeiten:

1. **Die Simulation ist fehlerbehaftet.** Daher stellt sie bestimmte Aspekte des Experiments falsch dar. Da sich insbesondere bei diesem Phänomen „Blick ins Weinglas“ eine Vielzahl von Aspekten überlagern, kann eine solche Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment lange unbeobachtet bleiben.
2. **Die Ursache für die bogenförmige Lichterscheinung wird von der Simulation nicht berücksichtigt.** Die Annahmen, die Parameter und gegebenenfalls auch die Vereinfachungen, die in die simulierten Daten eingehen, müssen noch einmal kritisch geprüft werden.

Aufgrund der vielen Übereinstimmungen zwischen Simulation und Experiment, ging ich davon aus, dass das Modell das Experiment hinreichend genau beschreibt. Die Existenz des farbigen Lichtbogens deutet auf einen Dispersionseffekt hin. Dieser kann jedoch nicht durch die Lichtbrechung in der Flüssigkeit entstehen, da deren Brechungsindex bereits berücksichtigt wird. Der Brechungsindex des Glases selbst bleibt jedoch in der Simulation unberücksichtigt. Der Lichtweg durch das Weinglas wird sozusagen vernachlässigt. Kann die Brechung im Glas selbst für den farbigen Lichtbogen verantwortlich sein?

Es ist im Experiment natürlich nicht möglich, den Einfluss des Glases zu entfernen. Man kann ihn jedoch deutlich minimieren, indem man ein Glas mit sehr dünner Wandstärke verwendet. Hängt die Entstehung des bunten Lichtbogens davon ab, so müsste sie weniger deutlich oder sogar überhaupt nicht beobachtbar sein, wenn das Weinglas eine dünne Wandstärke hat.

Genau dies zeigt sich im Experiment in Abbildung 7.17. Beleuchtet man zwei einigermaßen gleich geformte Weingläser, von denen das eine eine deutlich dünnere Wandstärke hat, aus gleicher Entfernung, so zeigt sich bei dem Glas mit der dünneren Wandstärke der bunte Lichtbogen auf dem Schirm nicht.

7.3. Einsatz des Phänomens im Seminar

An dieser Stelle ging ich davon aus, dass ich aufgrund meiner bisherigen Tätigkeiten ausreichend auf einen Einsatz des Phänomens in einem Seminar mit Studierenden vorbereitet war.

7.3.1. Beobachtungen

Ich führte das Phänomen mit dem Rotweinglas R1 (Abb. 7.18 Mitte) vor. Das Glas war zunächst unbefüllt und stand im Strahlengang der eingeschalteten Lampe. An der Wand war deutlich das



Abbildung 7.17.: **Links:** Beim Beleuchten eines Weinglases mit einer sehr dünnen Wandstärke zeigt sich der bunte Lichtbogen auf dem Schirm nicht.
Rechts: Im Gegensatz dazu ein Weinglas mit größerer Wandstärke.

Bild des durchleuchteten Glases zu beobachten. Die Abstände habe ich so gewählt, dass zum einen beim späteren Befüllen möglichst viele Aspekte zu beobachten sind und zum anderen das Abbild des Glases auf der Wand möglichst groß ist. Ich stellte nun die Frage: „Was erwarten Sie an der Wand zu sehen, wenn ich nun das Glas mit Wasser fülle?“

Studierende:

S1: Keine Ahnung - Das Bild wird heller.

S2: Wieso?

S1: Weil das Glas wie eine Linse wirkt, die das Licht bündelt.

S3: Ich glaube, es wird dunkler, weil das Licht dann nicht mehr gerade durchkommt.

Hier versucht Student 1 (S1) offenbar, das Bild an der Wand mit einer früher gemachten Erfahrung in Beziehung zu setzen und Vorhersagen zu machen. Er hat entweder schon einmal mit einer Linse experimentiert oder einen entsprechenden Versuch beobachtet. Dabei beobachtete er, dass das Licht gebündelt wird. Ich habe dann das Glas langsam mit Wasser gefüllt. Beim Befüllen lassen sich viele interessante Phänomene beobachten. Zunächst beginnt sich das an der Wand abgebildete Glas langsam mit „schwarzem Wasser,“ zu füllen. Plötzlich, nachdem das Glas etwa zu $1/3$ gefüllt ist, beginnt ein heller Lichthof von oben herunter zu laufen, bis er etwa die halbe Höhe des Glases erreicht. Von diesem Moment an bildet sich in dieser Höhe eine helle, leicht gekrümmte Linie.

Studierende:

S1: Komisch diese Linie...

S2: Es ist oben viel heller als unten [...] Stell mal das Glas näher an die Wand.

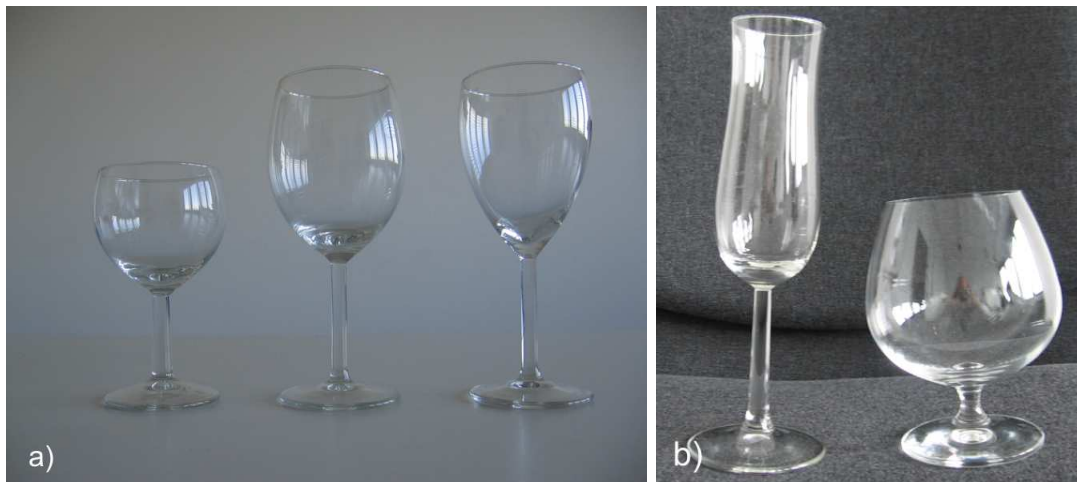


Abbildung 7.18.: Weinglasarten:

- a) kleines Rotweinglas R2 (links), rundes Rotweinglas R1 (mitte) und schmales Weissweinglas W1 (rechts)
- b) Sektflöte (links) und Cognacglas (rechts)

S3: Das sind ja mehrere Linien. Kannst Du sehen wie viele es sind?

S2: Drei

Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass es sich nicht nur um eine einzelne Linie handelt, sondern um insgesamt drei dicht beieinander liegenden Linien. Diese Tatsache ist mir bis zu diesem Moment noch nicht aufgefallen. Durch Verschiebung des Glases zur Wand hin lassen sich diese Linien deutlich trennen. Da die hellen Linien eine sehr auffällige Erscheinung sind, verwundert es nicht, dass die Aufmerksamkeit der Studierenden sich auf dieses Phänomen konzentrierte.

7.3.2. Fragestellungen

Zunächst scheinen die Studierenden wirklich überrascht zu sein, als sie die sehr auffällige helle Lichtlinie in der Mitte des Schirmbildes beobachteten. In der darauf folgenden Phase versuchten sie, sich einen Überblick über die an diesem Phänomen beobachtbaren Aspekte zu verschaffen, indem sie beispielsweise (zunächst ohne Zielvorstellungen) die Abstände Lampe/Glas und Glas/Schirm veränderten. Dabei bildeten sich folgende Fragestellungen:

1. Welchen Einfluss hat der Brechungsindex der verschiedenen Materialien (Luft, Wasser und Glas)?
2. Hängen die Phänomene von der Krümmung des Glases ab?
3. Hängen die Phänomene von den Abständen Glas-Lampe und Glas-Wand ab? (Daraus folgten Überlegungen zum Thema „Brennpunkt“)
4. Erst das gefüllte Glas macht das Phänomen sichtbar. Spielt das Medium Wasser eine bzw. die entscheidende Rolle?



Abbildung 7.19.: Bei einem Weissweinglas (links) entsteht in der Mitte des Schattenbildes ein Schattenbereich. Bei einem Rotweinglas (rechts) treten in der Mitte helle Lichtlinien auf.

5. Welchen Einfluss hat die Lampe auf das Phänomen?
6. Wie kommt die helle Lichtlinie in der Mitte des Schattenbildes zu stande?

7.3.3. Beobachtungen und Untersuchungen

Es zeigte sich im Allgemeinen, dass die Studierenden das „Schattenbild“ an der Wand sehr genau beobachteten. Eine Beschreibung der Vorführung des Phänomens ist die Folgende:

Studierende:

Zu Beginn des Befüllens wird der Schatten im unteren Bereich schwarz. Je voller das Glas wird, desto größer wird der dunkle Bereich des Schattens. Wenn das Glas etwa halb voll ist, wird der oberhalb der Hälfte entstehende Schatten deutlich heller als der in der unteren Hälfte. Etwa in der Mitte des Schattenbildes entsteht ein waagerechter Streifen, der bei steigendem Wasserstand heller und breiter wird.

Oder eine andere Beobachtungsbeschreibung:

Studierende:

Ein dunkles Schattenbild wandert mit steigendem Füllstand des Glases langsam nach oben, dabei ist die Oberkante radial gekrümmt. [...] gleichzeitig wandert ein helleres Schattenbild langsam nach unten und die Schattengrenzen laufen aufeinander zu. Zum Zeitpunkt der Überschneidung und danach ist der Schatten des gefüllten Glases heller. Es wird ein gekrümmter Lichtbogen an die Wand projiziert, der bei weiterer Befüllung immer heller und schärfer wird.

Die Studierenden beobachteten nicht nur die auffälligen Lichterscheinungen sondern auch, dass sich während des Füllens zwei Schattengrenzen von oben und unten einander annähern. Auf diese „Schattenverläufe“ bin ich erst durch die Studierenden aufmerksam geworden, ebenso wie auf die Tatsache, dass der obere Schattenbereich nach dem Befüllen heller ausgeleuchtet wird

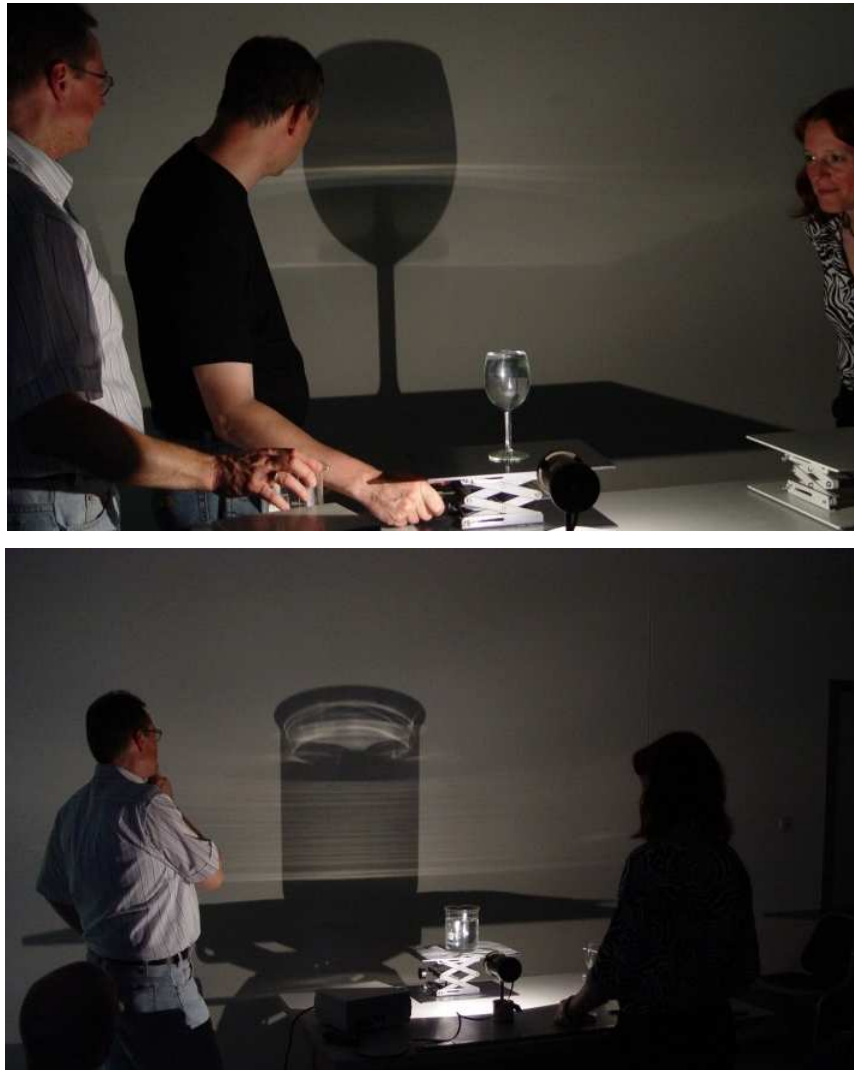


Abbildung 7.20.: Die ausgebildeten Lehrer beim „Blick ins Weinglas“. Im oberen Bild untersuchen sie die helle(n) Lichtlinie(n) in der Mitte des Schattenbildes. Im unteren Bild versuchen sie deren Herkunft mit Hilfe anderer Glasformen (hier Zylinderglas) auf die Spur zu kommen.

als der untere Bereich. Auch die bereits ausgebildeten Lehrer, die mit diesem Phänomen experimentierten, betrachteten diese „Feinheit“ des Schattenverlaufs nicht. Nach meiner Erfahrung empfinden die meisten Gruppen die helle Lichtlinie in der Mitte als besonders auffällig. Daher bezogen sich die ersten Untersuchungsansätze in der Regel ausschließlich auf diese Lichtlinie. Die helle Linie tritt nicht bei allen Glasformen auf. Offenbar muss das Glas eine bestimmte Form haben, damit die Linie beobachtbar wird (Abb. 7.19). Nachdem die helle Lichtlinie beobachtet wurde, entstand der Wunsch diese näher zu untersuchen. Dazu stellten die Studierenden zu Beginn unterschiedliche Gläser in den Strahlengang der Lampe. Zur Verfügung standen zunächst zwei Arten von Gläsern, die ich bereithielt. Es handelte sich dabei um ein Weissweinglas und zwei Rotweingläser (Abb. 7.18 a). In den darauf folgenden Seminarterminen brachte eine Gruppe eigene Gläser zum Experimentieren von zu Hause mit (Abb. 7.18 b). Dabei handelte es sich um eine schmale Sektflöte und ein kleines Cognacglas. Bei der Sektflöte traten die Lichtlinien zwar auf, sie befanden sich jedoch deutlich unterhalb der Glasabbildung an der Wand. Dieser

Sachverhalt legte die folgende Vermutung nahe:

Studierende:

S1: Da sind ja gar keine Linien...

S2: Das muss was mit der vertikalen Krümmung zu tun haben.

Die ist bei dem Cognacglas viel größer.

Mit der “vertikalen Krümmung” beschreibt S2 die untere Krümmung des Glases im Bereich des Stiels. Diese erstreckt sich bei einem Cognacglas aufgrund der Kugelgestalt fast über das gesamte Glas, während sie bei der Sektflöte nur den untersten Bereich um den Stiel einnimmt. Der Betrag der Krümmung ist jedoch davon unabhängig und bei dem schmalen Glas sogar noch größer als bei dem Cognacglas. Nun wurde versucht, einen möglichen Zusammenhang zwischen der Krümmung unten am Glas und den Lichtlinien zu finden. Dazu wurde ein zylindrischer Rundkolben in den Strahlengang der Lampe gestellt. Im Schattenbild an der Wand traten dann, genau wie bei meinen Untersuchungen in Abschnitt 7.1.3, keine Lichtlinien mehr auf.

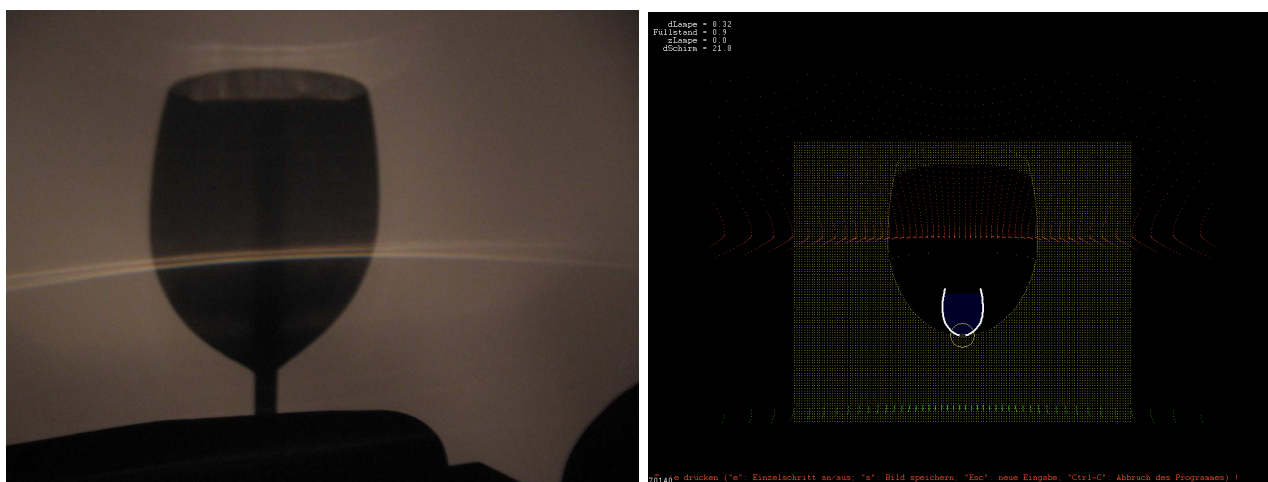


Abbildung 7.21.: Bei Simulation des Schirmbildes $d_{LG} = 30\text{cm}$, $d_{GS} = 71\text{cm}$ zeigt sich keine Aufspaltung der Lichtlinie.

Die bereits ausgebildeten Lehrer gingen bei ihren Untersuchungen ähnlich vor. Auch sie interessierten sich nach Demonstration des Phänomens ausschließlich für die helle mittlere Lichtlinie. In Abbildung 7.20 kann man beobachten, dass sich die Lichtlinie an der Wand in drei Linien aufspaltet. Dies erkennt man besonders an den Seiten. Die Lehrer nahmen diese Aufspaltung der Linie zwar wahr, untersuchten sie jedoch nicht näher. Das Gleiche gilt für die meisten Gruppen der Studierenden. Die Aufspaltung der Lichtlinie ist nur bei einem bestimmten Abstandsverhältnis deutlich beobachtbar. Das bedeutet, dass man entweder rein zufällig auf diesen Aspekt des Phänomens stößt, oder gezielt danach suchen muss. Wenn die Aufspaltung jedoch beobachtet wurde, ergab sich die (neue) Frage:

7. Warum spaltet sich die helle Lichtlinie in weitere Linien auf?

Bis zu diesem Zeitpunkt hatte ich mir diese Frage nie gestellt, da ich die Aufspaltung der Linie bisher nicht bewusst wahrgenommen hatte. Um für mich selbst eine Antwort zu erhalten,

stellte ich zunächst im Experiment eine Situation ein, in der die Aufspaltung der Linie zu beobachten ist (Abb. 7.21 links). Danach simulierte ich das Schirmbild mit den entsprechenden Parametern. Das Ergebnis war enttäuschend, denn in der Simulation war keine Aufspaltung der Linie zu beobachten (Abb. 7.21 rechts). Dies könnte daran liegen, dass bei der Simulation zu wenig Lichtstrahlen betrachtet werden, die Punkte also möglicherweise nicht dicht genug liegen, um solch feine Intensitätsabstufungen beobachten zu können. Um dies zu prüfen, drehte ich das Weinglas auf der Stelle ein wenig um sich selbst und beobachtete dabei das Schirmbild. Dabei verschwand plötzlich die Aufspaltung der Lichtlinie und wurde bei weiterer Drehung des Glases wieder sichtbar (Abb. 7.22). Daher kann die Aufspaltung nur durch eine Unsymmetrie begründbar sein. Das Glas bzw. die Glaswand ist herstellungsbedingt nicht an allen Stellen gleich stark. Bei einer Verdrehung des Glases ändert sich somit unter Umständen lokal die Glasdicke und trägt zur Aufspaltung der Lichtlinie bei⁶.

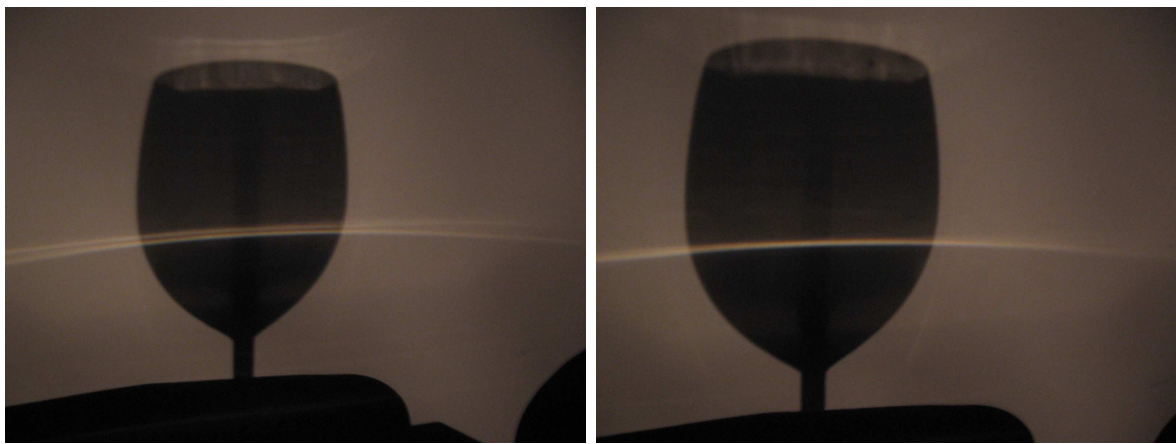


Abbildung 7.22.: Dreht man das Weinglas bei konstanten Abständen um sich selbst, so verschwindet plötzlich die Aufspaltung der Linie. Bei weiterer Verdrehung des Glases taucht die Aufspaltung wieder auf.

Das Hauptaugenmerk sowohl der Lehrer, als auch der Studierenden lag bei der Frage nach der oder den Ursachen für die Lichtlinie. So beobachteten die Lehrer ebenfalls das Schattenbild anderer Glasformen. Sie experimentierten mit einem kugelförmigen Rundkolben (Abb. 7.6 rechts) und mit verschiedenen zylindrischen Rundkolben (Abb. 7.20 unten). Das zylindrische Glas erzeugt ebenfalls helle linienförmige Erscheinungen an der Wand. Es entsteht eine Schar von parallelen dünnen Streifen. Die Lehrer diskutierten nun über das, was sie beobachteten. Als Ergebnis hielten sie fest:

Lehrer:

Der kugelförmige Rundkolben und das Zylinderglas wirken wie eine Linse. Das Kugelglas wirft einen hellen Brennpunkt an die Wand (Abb. 7.6 rechts). Das Zylinderglas wirkt wie eine Zylinderlinse. Sie bündelt das Licht auf einer (senkrechten) Brennlinie. Dahinter laufen die Lichtstrahlen wieder auseinander, und so entsteht der helle Bereich auf dem Schirm, der jenseits der Brennlinie aufgestellt ist. Da die Streifenbilder bei unterschiedlichen Zylindergläsern etwas anders aussehen, scheinen die Streifen durch Variationen der Wandstärke bedingt durch die Glasherstellung zu Stande zu kommen.

⁶An einem zylindrischen Rundkolben lassen sich auch Linien aufgrund Dickenschwankungen beobachten.

Im Falle der einfachen Glasformen entwickelten die Lehrer relativ schnell Vorstellungen über die beobachteten Aspekte. Allerdings scheiterten sie (so wie ich) bei dem Versuch, die beobachtete Lichtlinie des Weinglases auf die Beobachtungen an den „einfachen“ Gefäßen zurückzuführen.

8. Was haben die Beobachtungen bei den einfach geformten Gläsern mit der hellen Lichtlinie des Weinglases zu tun?

Eine klare Antwort auf diese Frage konnten sowohl die Studierenden, als auch die Lehrer nicht geben. Es wird sich im Laufe meiner späteren Untersuchungen noch herausstellen, dass es keine einfache Antwort auf diese Frage gibt.

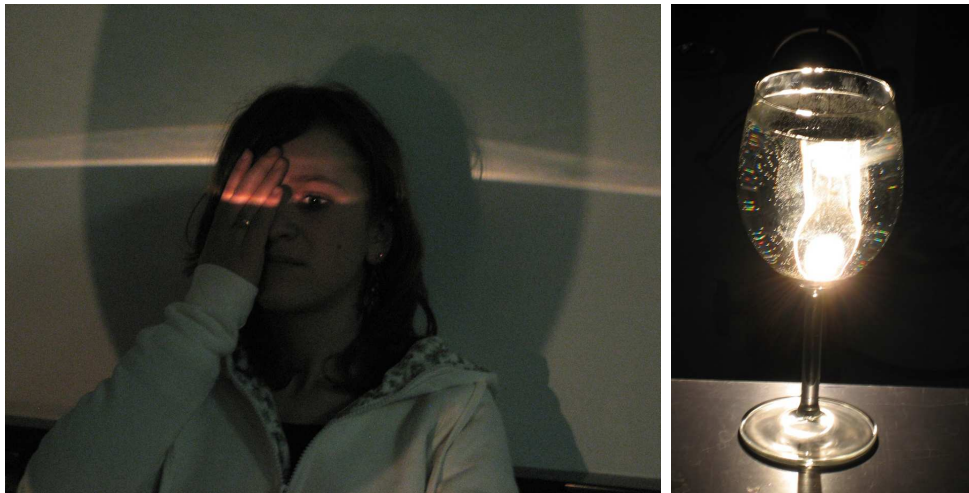


Abbildung 7.23.: **Links:** Ein Mädchen blickt vom Schirm aus in Richtung der Lampe in das Glas hinein.
Rechts: So sieht das Weinglas aus der Sicht des Mädchens im linken Bild aus.

So konzentrierte man sich im Folgenden darauf, mehr Informationen über den Ursprung der Lichtlinien zu sammeln. Die Studierenden versuchten daraufhin herauszufinden, welcher Bereich des Weinglases für diese Linien verantwortlich ist. Dies geschah entweder dadurch, dass einzelne Teilbereiche des Glases verdeckt wurden und das Schattenbild beobachtet wurde (vgl. Abb. 7.7), oder man blickte aus Richtung des Schirms in Richtung Lampe in das Glas hinein und variierte die Augenhöhe. Wenn sich die Augen auf gleicher Höhe wie die Lichtlinie befinden, so empfindet man den unteren Bereich des Glases besonders hell.

Auf diese Weise waren sie qualitativ in der Lage, einen Bereich des Glases anzugeben, durch den das Licht fällt, welches für die Lichtlinie auf dem Schirm verantwortlich ist. Eine andere Gruppe machte den Strahlengang des Lichts durch das Glas mit einem Laser sichtbar.

Studierende:

Den Strahlverlauf nach dem Austritt aus dem Glas haben wir mit einem Blatt Papier betrachtet. Dabei haben wir festgestellt, dass die Strahlen, die beim Glaseintritt nach oben abgelenkt werden, auch beim Austritt nach oben gebrochen werden. Die Strahlen, die nach unten gebrochen werden, werden dies auch nochmals nach dem Austritt.

Leider verfolgt die Gruppe ihre Untersuchungen in dieser Richtung nicht weiter. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass sie keinen Zusammenhang zwischen dem „Bild“ des Strahlengangs und den beobachteten Phänomenen herstellen konnten. Die Kenntnis des Verlaufs

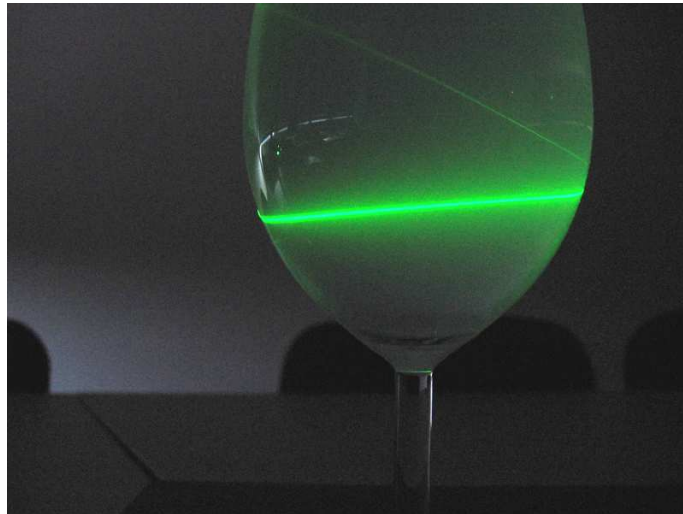


Abbildung 7.24.: Eine Gruppe von Studierenden machte den Strahlengang des Lichts mit einem Laserstrahl sichtbar. In der Abbildung lässt sich die Reflexion an der inneren Glaswand erkennen. Das Bild wurde nachgestellt.

eines Lichtstrahls ist eben, für sich allein genommen, noch nicht besonders hilfreich. Erst wenn man den Verlauf vieler Lichtstrahlen (zusammen) betrachtet, sind Aussagen über die Entstehung einzelner Phänomene möglich.

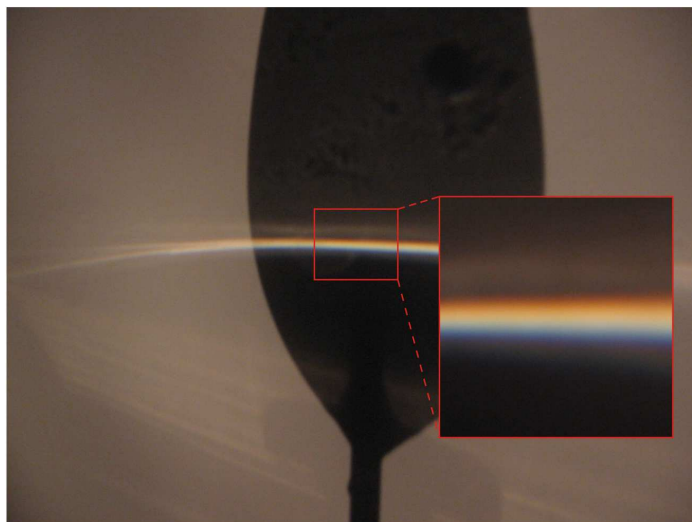


Abbildung 7.25.: Bei Näherer Betrachtung der Lichtlinien erkennt man eine leichte Farbaufspaltung

7.3.4. Farbaufspaltung der Lichtlinie

Eine der Gruppen machte eine besondere Beobachtung: Betrachtet man die Lichtlinien an der Wand aus nächster Nähe, so erkennt man eine leichte Farbaufspaltung (Abb.7.25). Ein weiterer wichtiger Punkt, der mir bisher ebenfalls nicht aufgefallen war. Die Aufspaltung hängt

maßgeblich von den geometrischen Anordnungen des Versuches ab. Steht das Glas zu nahe an der Wand, lässt sich die Aufspaltung nicht beobachten, da sie zu klein ist. Ist das Glas zu weit von der Wand entfernt, so sind die Farben zu schwach, um sie zu beobachten. Nachdem diese seltsame Farbaufspaltung der Lichtlinie beobachtet wurde, rückte sie sofort in das Zentrum der weiteren Untersuchungen:

9. Wie kommt die Farbaufspaltung der hellen Lichtlinie zu Stande?

Es begann eine Diskussionsrunde zum Thema „Farbaufspaltung von Licht“. Welche Ursachen kommen generell für eine Farbaufspaltung in Frage? Es wurden

1. Lichtbrechung am Prisma,
2. Regenbogen und
3. Beugung am Spalt

genannt. Die Lichtbrechung am Prisma wurde sofort ausgeschlossen, da am und im Glas keine prismenähnliche Objekte erkennbar sind. Gleiches gilt für die Beugung, da Beugungseffekte nur an kleinen Öffnungen beobachtbar sind. So konzentrierte man sich auf den Punkt „Regenbogen“. Die Gruppe führte daraufhin eine Literaturrecherche zum Thema Regenbogen durch. Dabei stieß sie auf einen Versuch zu diesem Thema, der in Abbildung 7.26 dargestellt ist. Sie hatten die Hoffnung, dass dieses Experiment Antworten auf ihre Frage(n) liefern könne.

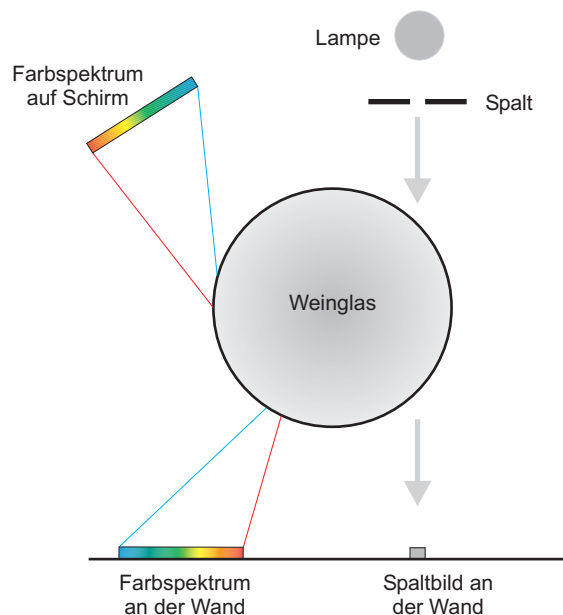


Abbildung 7.26.: Versuchsaufbau zum Untersuchung der Farbaufspaltung der Lichtlinien

Ein verstellbarer Spalt wurde zwischen die Lampe und das Glas gestellt. Dadurch wird nur ein kleiner Bereich des Glases durchleuchtet. Bei einer waagerechten Verschiebung des Spalts lassen sich verschiedene Ausschnitte der Lichtlinie an der Wand betrachten. Außerdem lässt sich die leichte Farbaufspaltung der hellen Lichtlinie an der Wand und auf einem Schirm neben

der Lampe erkennen.

Ein Weinglas befindet sich gemäß Abbildung 7.26 im Strahlengang der Lampe, und die Gruppe betrachtet das Schattenbild an der Wand.

Studierende:

S1: Die Farbintensität wird geringer und die Farben dunkler.

S2: Ja, umso weiter Du weg gehst, umso intensiver werden die Farben.

Der Eindruck der erhöhten Farbintensität entsteht durch das Einbringen des Spalts. Dadurch wird die Gesamtintensität deutlich abgeschwächt, und die Farben kommen besser zur Geltung, da eine Überstrahlung verhindert wird. Darauf hin tauscht die Gruppe das Weinglas gegen ein zylindrisches Becherglas aus.

Studierende:

S3: Warum tauscht Du das jetzt aus?

S2: Also, wir hatten doch die Vermutung, dass die vertikale Krümmung etwas mit Effekt zu tun hat.

S3 verschiebt dabei das Becherglas von links nach rechts. Dabei werden Spektralfarben entdeckt, die sich hinter dem Glas neben der Lampe befinden, indem ein Papier an diese Stelle gehalten wird.

Studierende:

S2: Da ist es ja!

S1: Bei dem Zylinder wird es halt so gebrochen, dass wir es nicht auf den Schirm gegenüber bekommen.

S2: Das hat halt was mit der Wölbung zu tun.

S1: Jetzt machen wir das nochmal mit einem anderen Glas.

Nachdem ein Mitglied der Gruppe das Glas langsam von links nach rechts verschoben hatte, wurden zufällig Spektralfarben hinter dem Glas neben der Lampe entdeckt. Sofort wurde ein Stück Papier an diese Stelle gehalten, um das Farbspektrum sauber aufzufangen. Die Gruppe glaubte damit die Farbaufspaltung der Linien erklären zu können, was in dieser Form nicht möglich ist, da diese Aufspaltung senkrecht von Rot nach Blau verläuft und nicht waagerecht wie an der Wand. Diese Erklärung wurde von den Studierenden jedoch nicht weiter zu Ende durchdacht. Es blieben noch einige Fragen offen.

1. Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Spektrum auf dem Schirm und der Farbaufspaltung der Linie an der Wand und wie sieht dieser aus?
2. Hat man, wenn man den Ursprung des Spektrums auf dem Schirm verstanden hat, auch gleichzeitig die Farbaufspaltung an der Wand verstanden?

7.3.5. „Erklärungsansätze“

Im Laufe des Seminars und auch darüber hinaus stellte ich mir oft die Frage, welche Erklärungen von Aspekten bezüglich des Phänomens „Blick ins Weinglas“ man bzw. ich von den Studierenden erwarten kann, und welche nicht. Beispielsweise ist die Frage nach der Ursache der hellen Lichtlinie schwierig zu beantworten. Da es sich bei dem Blick ins Weinglas um ein sehr komplexes Phänomen mit vielen Teilaspekten handelt, nimmt das Beobachten und Sammeln von Aspekten bei den Studierenden den Hauptteil der Untersuchungszeit ein. Fragen wie: „Wie verläuft das Licht durch das Glas?“ und „Durch welchen Teil des Glases verläuft das Licht, welches für einen bestimmten Aspekt verantwortlich ist?“ tauchen bei allen Gruppen immer wieder auf. Am Ende ihrer Untersuchungen formulieren die Studierenden folgende Sätze:

1. Die Entstehung der Lichtlinie hängt von der Art des Glases ab.
2. Die Lichtlinie hängt von der Krümmung des Glases ab.
3. Alle beobachtbaren Phänomene⁷ hängen von Abständen Glas-Lampe und Glas-Wand ab.
4. Erst das gefüllte Glas macht das Phänomen sichtbar. Das Medium Wasser spielt also eine entscheidende Rolle.
5. Aufgrund der Farbaufspaltung der Lichtlinie hat der Effekt irgendetwas mit „Dispersion“ zu tun.
6. Das Glas wirkt wie eine Sammellinse, die das Licht bündelt.

Letztendlich handelt es sich hierbei noch nicht um „Erklärungen“, die von den Studierenden formuliert werden, die zu Grunde liegenden Mechanismen werden jedoch in vielen Fällen richtig erkannt. Im Zusammenhang mit der Entstehung der hellen Lichtlinie wird oft folgendermaßen argumentiert:

Studierende:

Da das Glas außen gewölbt (konvex) ist, vermuten wir, dass es wie eine Sammellinse wirkt. Je nach Stärke der Wölbung an der Glasstelle, an der das Licht auftrifft, wird dieses gebrochen. Das würde erklären, woher der helle Bereich in der Mitte des Schattens kommt. Der restliche Bereich bleibt dunkel, da dort kein Licht mehr hinkommen kann.

Die Studierenden setzen voraus, dass die Wirkung des Glases mit der einer Sammellinse vergleichbar ist. Sie diskutieren jedoch nicht weiter, inwieweit sich Glas und Linse in Bezug auf die beobachtbaren Phänomene unterscheiden. Andere Gruppen äußerten sich folgendermaßen:

Studierende:

Decken wir die äußeren Bereiche des Glases ab, so ist der Effekt (die Lichtlinie) weiterhin sichtbar. Bei Abdeckung der Mittelachse ist der Effekt nicht vorhanden. Daraus schließen wir, dass ausschließlich die Lichtstrahlen, die auf die Mittelachse des Glases treffen, für die Lichtlinien relevant sind.

⁷Damit sind verschiedene, von den Studierenden beobachteten Phänomene auf den Schirm gemeint wie: Lichtlinie(n), Schatten oder Lichthof.

Oder:

Studierende:

Nur die Krümmung des Glases um die Horizontale ist für die Lichtlinien verantwortlich, denn bei dem zylindrischen Kolben sind die Lichtlinien nicht vorhanden. [...] Allerdings gab es auch andere Gläser (z.B. Sektkelch Abb. 7.18), bei denen diese Lichtlinien nicht festgestellt wurden. Hier sehen wir die Ursache darin, dass sich die Glasform aus vielen verschiedenen Krümmungen zusammensetzt.

Diese Gruppen gehen bei ihren Erklärungsversuchen einen Schritt weiter, da sie die jeweilige Krümmung des Glases in ihre Überlegungen mit einbeziehen. In der Aussage steckt implizit die Überlegung, dass das Glas als eine Überlagerung einer Zylinder- und einer Kugellinse betrachtet werden kann. Der kugelförmige untere Teil des Glases sorgt für einen hellen Lichtpunkt, der gleichzeitig von dem zylindrischen Beitrag zu einer Linie auseinander gezogen wird.

Zusammenfassend würde ich sagen, dass nach meinen Erfahrungen ein Großteil der Studierenden in der Lage ist, Ursachen des Phänomens oder einzelne Teilaspekte des Phänomens anzugeben. „Die Ursache der Lichtlinie hat was zu tun mit... Reflexionsgesetz,...dicke Linsen...“ Genauere Zusammenhänge zwischen den Phänomenen und den Gesetzmäßigkeiten können sie praktisch nicht angeben.

7.3.6. Bereitgehaltene Materialien

Folgende Materialien zum Experimentieren wurden von mir für das Seminar bereitgehalten:

1. Verschiedene Rotwein und Weissweingläser, darunter auch ein hochwertiges, extrem dünnes Glas (dieses kam erst später hinzu). Im Laufe der Zeit brachten auch die Studierenden eigene Gläser mit besonderen Formen mit.
2. Verschiedene Lichtquellen, darunter ein Laserpointer, ein Diaprojektor und mehrere Reuterlampen. Es stand auch eine hochwertige Taschenlampe zur Verfügung. Entfernt man den Reflektor der Taschenlampe, so erhält man eine relativ gute Punktlichtquelle.
3. Optische Geräte wie: Linsen, Spalte und Blenden
4. Verschieden geformte Gefäße unterschiedlicher Größe, darunter zylindrische Kolben, sowie Bechergläser und Rundkolben.
5. Papier und schwarz/weiße Pappe (zum Abdecken oder als Auffangschirm)
6. Farbfilter

7.3.7. Übersicht über die Aspekte des Phänomens

An dieser Stelle sind noch einmal alle Aspekte zusammengefasst, die das Phänomen „Blick ins Weinglas“ bietet und welche davon von den Studierenden bearbeitet wurden.

Aspekt des Phänomens	wurde beobachtet	wurde näher untersucht
Schattenwurf des Glases	ja	ja
Lichthof in der Mitte	ja	ja
Lichtlinie in der Mitte	ja	ja
kleine Linie unten (Wasserreflex)	ja	ja
andere Weingläser	ja	ja
Zylinder-Gläser	ja	ja
Rundkolben	teilweise	teilweise
Abstände Lampe/Glas/Schirm	ja	ja
andere Flüssigkeit(en)	teilweise	nein
Reflexe an Glasoberfläche	nein	nein
Spektrum in der Lichtlinie	einmal	einmal
bunter Lichtbogen oben	teilweise	teilweise
Schattengrenzen beim Befüllen	ja	nein
Aufhellung des oberen Schattens	teilweise	nein
Strahlengang verfolgt	ja	ja
Aufspaltung der Lichtlinie	einmal	nein
Reflexionen des Untergrundes	teilweise	teilweise
andere Lampe(n)	ja	ja
Farbfilter-Folien	teilweise	nein

Tabelle 7.2.: Zusammenstellung aller Aspekte des Phänomens „Blick ins Weinglas“, die von den Seminarteilnehmern beobachtet und untersucht *werden können* bzw. beobachtet und untersucht *wurden*.

7.4. Fazit

Bei dem Phänomen „Blick ins Weinglas“ offenbaren sich dem Betrachter eine ganze Reihe von Aspekten, die untersucht werden können. Daher bietet das Phänomen eine Vielzahl an Untersuchungswegen und Zielen. Dies wird nach meinen Erfahrungen von den meisten Gruppen als sehr ansprechend empfunden. Aussagen wie: „Wir konnten uns mal selbst aussuchen, was wir machen wollten.“ oder: „Ich hätte anfangs nicht gedacht, wie viel man da sehen kann“ bestärken mich darin. Andererseits gab es auch einige (wenige) Gruppen, die diese Vielzahl an Untersuchungsmöglichkeiten eher als störend empfanden.

Studierende:

Etwas schwierig war es, uns auf eine Beobachtung festzulegen und tatsächlich nur diese zu untersuchen. [...] Außer dem hier dokumentierten gab es noch einige andere Effekte, die uns immer wieder abgelenkt haben.

oder:

Studierende:

Die Erstellung der Mindmap hat uns den erhofften Erfolg gebracht. Die physikalische Einordnung ist uns grundlegend klar. Allerdings müssen wir noch den beobachteten Phänomenen und auch in vielen Teilbereichen die richtige Ursache zuordnen.

Das Isolieren einzelner Phänomene voneinander bereitet scheinbar immer wieder Schwierigkeiten und sollte daher immer wieder an solchen oder ähnlich komplexen Phänomenen geübt werden. Es müssen von den Gruppen Entscheidungen getroffen werden zwischen den Aspekten, die untersucht werden sollen, und denen, die „immer wieder ablenken“. Dabei müssen die Studierenden immer wieder sicherstellen, dass sie gerade den Aspekt des Phänomens untersuchen, den sie untersuchen wollen. Daher erfordert dieses Phänomen ein bestimmtes Maß an experimentellen Vorerfahrungen. Aus diesem Grund setze ich das Phänomen ausschließlich im letzten Teil des Seminars und bei Studierenden der Sekundarstufe 2 ein.

Abbildungen mit einer CD-Scheibe

Auf ein weiteres optisches Phänomen wurde ich durch einen Studenten aufmerksam. Er berichtete mir über interessante optische Eigenschaften von durchsichtigen CD¹-Scheiben, mit denen die CD-Rohlinge bei größeren Spindeln vor Kratzern und anderen äußeren Einflüssen geschützt werden. Mit diesen Scheiben könnten, nach seiner Aussage, optische Abbildungen erzeugt werden. Ich bat ihn daraufhin, dieses Experiment einmal für mich aufzubauen. Der Aufbau gestaltete sich wie folgt:

8.1. Das Phänomen

Im Abstand von einigen Zentimetern vor einer Lampe befindet sich auf einer optischen Bank ein senkrecht stehender transparenter CD-Rohling². Der mittlere Bereich um das Loch der CD wurde mit einer blauen Pappscheibe abgedeckt, damit das Licht nicht geradlinig durch das Loch fallen kann. Hinter der CD beobachtet man im einem Abstand von einigen Zentimetern auf einem Schirm einen hellen, weißen Punkt, der an eine Art „Brennpunkt“ erinnert. Bei Verschiebung der CD oder des Schirms, bleibt der Punkt in einem gewissen Bereich erhalten. Verlässt man diesen Bereich, so lassen sich Farbveränderungen des Punktes beobachten, bevor er schließlich ganz verschwindet.

Bei weiteren qualitativen Untersuchungen offenbaren sich eine Reihe weiterer Phänomene:

- Lässt man durch die Scheibe Sonnenlicht auf einen Schirm fallen, so entsteht ebenfalls ein heller Lichtfleck. Dieser „Brennpunkt“ entsteht jedoch nicht, wie bei einer Linse, nur bei einem bestimmten Abstand zwischen Scheibe und Schirm, sondern er bleibt vielmehr über ca. 10cm erhalten und ändert bei Vergrößerung des Abstandes zwischen Schirm und Scheibe seine Farbe von Rot über Weiß nach Blau.
- Hält man die Scheibe in einem Abstand von einigen Zentimetern vor eine weiße Wand, die einem Fenster gegenüberliegt, so beobachtet man auf der Wand ein unscharfes umgekehrtes Bild des Fensters. Eine vor dem Fenster stehende und mit dem Arm winkende

¹CD=Compact Disk

²Es ist nicht unbedingt nötig, das Phänomen auf einer optischen Bank durchzuführen. In der Praxis ist es ausreichend, die Reiter auf den Tisch zu stellen.

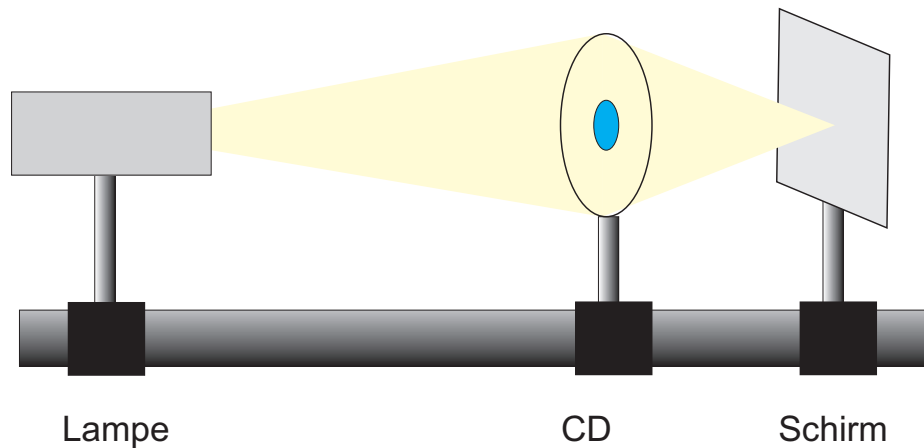


Abbildung 8.1.: In dieser Form demonstrierte der Student das Phänomen.

Person ist erkennbar. Dies zeigt, dass die CD nicht nur Licht sammelt, sondern so etwas wie auf dem Kopf stehende Bilder erzeugt.

- Diese Aussage wird verdeutlicht durch die Abbildung einer großen Ringleuchte (Abb. 8.2 rechts): Deutlich ist im Bild der Lampe zu erkennen, dass die Halterung links abgebildet wird, wenn sie sich selbst rechts befindet.

Da ich die Frage des Studenten, wie es möglich sei, dass eine CD derartige optische Abbildungen erzeugen kann, nicht beantworten konnte, entschloss ich mich, diesem Phänomenen selbst weiter nachzugehen (siehe auch [13, 12]). Ich ging davon aus, dass die oben beschriebenen qualitativen Aspekte alle auf den gleichen physikalischen Prinzipien beruhen.



Abbildung 8.2.: **Links:** Abbildung eines Fensters auf einer weißen Wand mit einer durchsichtigen CD-Scheibe.
Rechts: Abbildung einer Ringleuchte auf dem Schirm mit einer durchsichtigen CD-Scheibe.

8.2. Untersuchung des Phänomens

Zunächst versuchte ich, die gemachten Beobachtungen auf „etwas bekanntes“ zurückzuführen. Leider sollte sich herausstellen, dass dies nicht ohne weiteres möglich ist. Meine Untersuchungen waren von vielen Irrwegen und auch (wie sich später herausstellen wird) falschen Schlussfolgerungen geprägt. Daher möchte ich den „Weg der experimentellen Erkenntnisgewinnung“ ausführlicher beschreiben, um einen Eindruck über die Schwierigkeiten und Vielfältigkeiten der Untersuchungen zu vermitteln.



Abbildung 8.3.: Querschnittsvergleich Fresnel-Linse (links) und herkömmliche Linse (rechts) Quelle: Wikipedia 10/07

8.2.1. Die CD als Fresnel-Linse

Eine Fresnel-Linse, die heutzutage in den meisten Overhead Projektoren als Abbildungslinse benutzt wird, ist sehr flach und dünn (ebenso wie die CD). Außerdem besteht eine Fresnel-Linse aus einem konzentrischen Ringsystem, was in guter Näherung auch für eine CD gilt. Kann die Wirkung der CD deshalb mit der einer Fresnel-Linse verglichen, oder vielleicht sogar mit ihr beschrieben werden? Leider ergaben sich für mich beim genaueren Durchdenken immer mehr Punkte, die dagegen sprachen, dass CD und Fresnel-Linse auf den gleichen physikalischen Prinzipien beruhen.

1. Die Oberfläche der CD weist keinerlei fühlbare Struktur auf.
2. Es gibt keinen der Linsengleichung entsprechenden Zusammenhang zwischen Gegenstandsweite und Bildweite. Der Abstandsbereich zwischen CD und Schirm, indem ein erkennbares Bild aufgefangen werden kann, ist nahezu unabhängig von der Gegenstandsweite.
3. Farbfehler durch die Dispersion bei Lichtbrechung führen bei einer Linse aufgrund chromatischer Aberation bei blauem Licht zu einer kürzeren Brennweite als bei rotem Licht. Im Experiment mit der CD beobachtete ich aber genau das Gegenteil.

Für die weiteren Untersuchungen wurden die Versuchsbedingungen so verändert, dass die Effekte einfacher und intensiver wurden.

8.2.2. Beobachtungen unter monochromatischem Licht

Handelt es sich bei diesem Phänomen wirklich um eine Abbildung im eigentlichen Sinn? Zum einen fällt es sehr schwer den Ort auszumachen, an dem das „Bild“ scharf zu sein scheint, und zum anderen führt die Beleuchtung mit weißem Licht zu Farbsäumen und zur Überstrahlung. Daher vereinfachte ich den Aufbau für die weitere Untersuchung, in dem ich:

1. Einen grünen, frequenzverdoppelten Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 532nm$ als Lichtquelle einsetze. Dadurch entstehen keine Farbsäume, und es gibt kaum noch Überstrahlung.
2. Den Laser mit einer Linse $f = 5mm$ aufweitete. Hinter diese Linse stellte ich eine zweite Linse ($f = 150mm$), um das aufgeweitete, divergente Lichtbündel in ein Parallelbündel zu überführen.

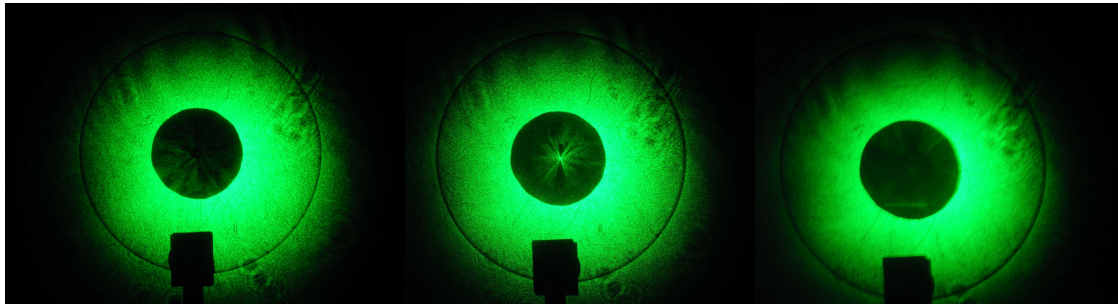


Abbildung 8.4.: Schirmbilder bei unterschiedlichen Schirmabständen. **Links:** Bei einem Abstand von 5cm ist kein Punkt in der Mitte zu erkennen. **Mitte:** In mittlerer Entfernung von 13cm ist der Punkt deutlich zu erkennen. **Rechts:** Bei einem großen Abstand von 19cm ist der Punkt wieder verschwunden.

Ich untersuchte die fokussierende Wirkung der CD, indem ich sie so hinter der Aufweitungslinse platzierte, dass sie vollständig mit parallelem Licht ausgeleuchtet wurde. Im nächsten Schritt stellte ich einen Schirm hinter die CD. Man beobachtet auch in diesem Fall einen hellen Punkt in der Mitte des Schirmbildes. Da aufgrund der mittleren Abdeckung des Loches auf der CD kein Licht geradlinig auf den Schirm fallen kann, muss dieses Licht von den äußeren Bereichen der CD her stammen. Wird das Licht hier wie bei einer Linse gebündelt? Ich variierte den Abstand zwischen Schirm und CD (Abb. 8.4). Es zeigt sich, dass der helle Punkt erst bei einem Schirmabstand von etwa 6cm erscheint und bei weiterer Bewegung des Schirms nach Hinten bei einer Entfernung von mehr als 16cm wieder verschwindet. Es handelt sich also eher um eine „Brennlinie“ als um einen Brennpunkt. Darüber hinaus existiert ein heller Lichtsaum um diesen Punkt herum (Abb. 8.4 mitte), der sich im Laufe der Verschiebung verändert. Die Helligkeit des Mittelpunktes bleibt dabei weitgehend konstant.

Wie kann die Scheibe diese helle Linie erzeugen? Die oberen Argumente gegen die Fresnel-Linse schienen generell gegen Lichtbrechung als entscheidenden Mechanismus zu sprechen, der der Bildentstehung zugrunde liegt. Ich schlussfolgerte, dass es sich dann um einen Beugungs- und Interferenzeffekt handeln müsse.

8.2.3. Die CD als Zonenplatte

Eine so genannte Fresnelsche Zonenplatte besitzt ähnliche optische Eigenschaften wie Linsen. Kann es sich bei der CD-Scheibe um eine solche Zonenplatte handeln?

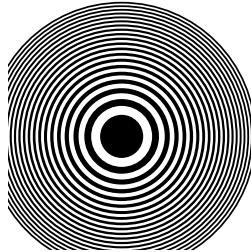


Abbildung 8.5.: Eine Fresnel'sche Zonenplatte besteht aus einem System konzentrischer Ringe mit nach außen abnehmendem Abstand.

Eine solche Zonenplatte besteht aus einem konzentrischen System von Ringen (Abb. 8.6), deren Radius proportional zur Wurzel aus ihrer Nummer ist: $r^2 \sim n$. Der Abstand zweier benachbarter Ringe nimmt daher mit wachsendem Radius mehr und mehr ab. Eine Zonenplatte besitzt eine Folge von Brennpunkten. Die zugehörigen Brennweiten ergeben sich aus (nach [29]):

$$f_m = \frac{1}{m} \frac{r_n^2}{n\lambda}, \quad m = 1, 3, \dots \quad (8.1)$$

Dabei ist r_n der äußere Radius des n -ten Ringes. Es werden sowohl die durchsichtigen als auch die undurchlässigen Ringe gezählt. r_0 bezeichnet den Radius der zentralen undurchsichtigen Scheibe. Die Radien der Kreise sind gerade so konstruiert, dass die Lichtwellen, die den so genannten Hauptbrennpunkt ($m = 1$) von benachbarten Ringen erreichen (Abb. 8.6), gerade einen Gangunterschied von λ aufweisen ([29, 84]). Zu den weiteren Brennpunkten gehören die Brennweiten $\frac{f_1}{3}, \frac{f_1}{5}, \dots$. Man kann eine Zonenplatte daher auch als konzentrisches Beugungsgitter auffassen, indem die erste Beugungsordnung im Hauptbrennpunkt zusammenläuft. Alle weiteren Brennpunkte werden durch entsprechend höhere Ordnungen gebildet.

Bei einem System zahlreicher äquidistanter konzentrischer Ringe gibt es immer eine Zahl von Ringen, die die Bedingung $r^2 \sim n$ erfüllen. Leider gibt es auch hier zwei einschlägige Gegenargumente:

1. Welche Rolle spielen dann alle anderen Ringe, die diese Bedingung nicht erfüllen? Es könnte unter den zahlreichen Ringen auch immer solche geben, die die von den eben ausgewählten Ringen kommenden Wellen gerade auslöschen.
2. Das Experiment zeigt keine Folge weit auseinander liegender Brennpunkte, sondern eine kontinuierliche helle Linie.

8.2.4. Der Aufbau einer beschreibbaren CD

Nachdem auch diese zweite spontane Idee sich offenbar nicht als zielführend erwies, entschloss ich mich zunächst Informationen über die Beschaffenheit von solchen CD-Rohlingen (insbesondere über die Abmessungen der Rillenstruktur) zu sammeln. Allerdings zeigte sich dies als

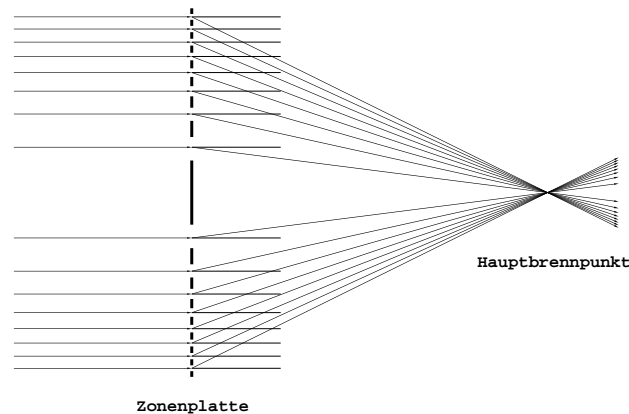


Abbildung 8.6.: Die ersten Beugungsordnungen werden von einer Zonenplatte so abgelenkt, dass sie sich im Hauptbrennpunkt treffen.

problematisch. Man findet zwar eine Menge Informationen über die „Funktionsweise“ von CD's, jedoch kaum etwas über präzise technische Daten.

Ein CD-Rohling besitzt eine spiralförmige Führungsrille für den Laser, die einen trapezförmigen Querschnitt aufweist deren Neigungswinkel 50° beträgt [85]. Diese Führungsrille ist eingebettet in einen durchsichtigen Plastikträger aus Polycarbonat. Auf diese Schicht wird dann die für die Informationsspeicherung wichtige Dye-Schicht aus Phthalocyanin aufgebracht. Im Vergleich zur Polycarbonat Schicht ist diese sehr dünn. Darauf folgen eine Metallschicht zur Reflexion und eine äußere Schutzschicht, die beide bei unserem Exemplar fehlen, da die CD transparent ist.

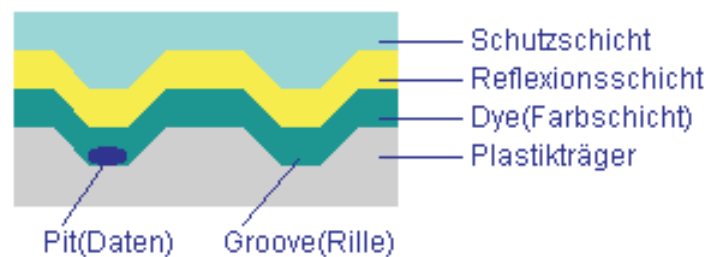


Abbildung 8.7.: Aufbau der einzelnen Schichten eines CD-Rohlings nach [85].

Die obere Kante der Führungsrille hat eine Breite von $b = 700nm$. Wir betrachten die Rille in diesem Zusammenhang näherungsweise als ein System aus konzentrischen Ringen. Der Rillen Abstand ist nicht bekannt, entspricht aber einer Gitterkonstante g . Der beschreibbare Bereich der CD hat einen Außendurchmesser von $12cm$ und einen Innendurchmesser von $4,6cm$. Daraus ergibt sich die Breite des beschreibbaren Bereiches von $3,7cm$. Da man eine Zonenplatte auch als ein ringförmiges Beugungsgitter auffassen kann, dessen Gitterkonstante von innen nach außen abnimmt kam ich auf die Idee, die CD stattdessen als ringförmiges Gitter mit konstantem Linienabstand aufzufassen.

8.2.5. Die CD als konzentrisches Beugungsgitter

Zunächst bestimmte ich die Gitterkonstante dieses Gitters. Dazu entfernte ich die Aufweitungslinse und wählte einen Aufbau gemäß Abb. 8.8. Die CD befindet sich in der Ebene Σ_1 und das Schirmbild in der Ebene Σ_2 . Die beiden kartesischen Koordinatensysteme seien so festgelegt, dass sich die Nullpunkte von Σ_1 und Σ_2 im Mittelpunkt der CD bzw. des Schirms befinden. Das Gitter auf der CD steht senkrecht auf der Abszisse in Σ_1 , so dass bei Beleuchtung eines Punktes auf der Abszisse die gebeugten Ordnungen entsprechend auf der Abszisse in Σ_2 liegen.

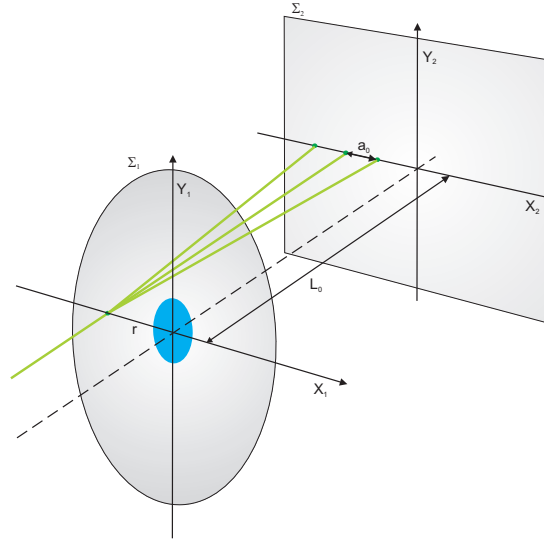


Abbildung 8.8.: Aufbau zur Bestimmung der Gitterkonstante der CD. Es werden nur die ersten Beugungsordnungen dargestellt. Aus den Abständen a_0 und L_0 lässt sich die Gitterkonstante g bestimmen.

Der nicht aufgeweitete Punkt des Lasers trifft die CD auf der Abszisse im Punkt $(-r, 0)$. Zur Bestimmung der Gitterkonstante bestimmte ich den Schirmabstand L_0 und den Abstand der ersten Beugungsordnungen a_0 . Mit Hilfe der Gittergleichung

$$g \cdot \sin(\phi) = n\lambda \quad (8.2)$$

ergibt sich durch den Beugungswinkel

$$\tan(\phi) = \frac{a_0}{L_0} \quad (8.3)$$

und $a_0 = 8\text{cm}$ sowie $L_0 = 20\text{cm}$ eine Gitterkonstante von $g = 1,43\mu\text{m}^3$.

8.2.5.1. Vertikale Verschiebung des Lasers

Nun soll die Situation verallgemeinert werden, indem die CD als ein kreisrundes Beugungsgitter betrachtet und der Laser in der Vertikalen verschoben wird. In diesem Fall müssen Beugungserscheinungen an den entsprechenden Punkten auf der CD untersucht werden. Ich änderte den

³Für kommerzielle gepresste CDs ergibt sich stattdessen, gemessen bei senkrechtem Lichteinfall im reflektierten Licht, eine Gitterkonstante von etwa $g = 1,63\mu\text{m}$ [25].

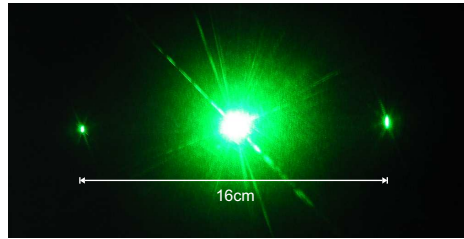
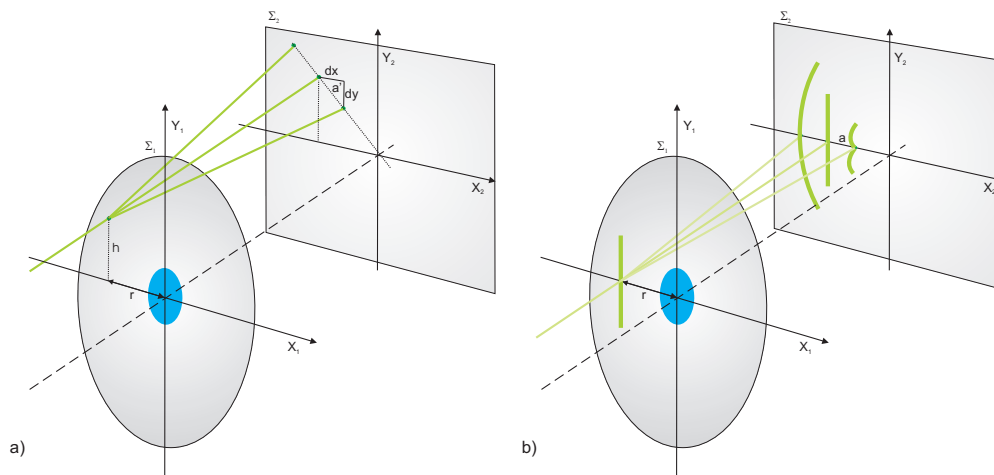


Abbildung 8.9.: Foto der nullten und ersten Beugungsordnungen.

Aufbau in Abb. 8.8 so ab, dass der Laser in einer vertikalen Verschiebung bzw. einer Höhe h auf die CD trifft.

Abbildung 8.10.: **Links:** Verdrehung des Beugungsbildes bei vertikaler Verschiebung des Lasers.

Rechts: Ausleuchtung der CD mit einem senkrechten Spalt. Es werden nur die ersten Beugungsordnungen dargestellt.

Das Beugungsbild der Punkte verdreht sich dann um einen Winkel α , der durch $\tan(\alpha) = h/r$ von der vertikalen Verschiebung abhängig ist. Der Abstand a der ersten Beugungsordnungen von der nullten Ordnung bleibt dabei konstant. Im Experiment in Abbildung 8.4 wird die CD jedoch vollständig ausgeleuchtet. Deshalb muss die Betrachtungsweise von einer punktförmigen Beleuchtung der CD entsprechend erweitert werden, indem die CD mit einem senkrechten Spalt beleuchtet wird.

8.2.5.2. Beleuchtung der CD mit einem senkrechten Spalt

Die CD wird nun mit einem senkrechten Spalt ausgeleuchtet. Das entstehende Beugungsbild lässt sich als eine „Summe“ punktförmiger Beleuchtungen im Sinne von Abbildung 8.10 links verstehen. Das bedeutet, bei einem im Radius r auf die CD treffenden Spaltbild, dass für jeden Punkt auf dem Spalt die Orte der ersten Beugungsordnungen auf dem Schirm bestimmt werden müssen. Hat der Spalt die Länge l , so liegen alle Punkte (r, h) mit $-l/2 \leq h \leq l/2$ auf dem Spalt (In diesem Zusammenhang wird die Breite des Spalts zunächst noch vernachlässigt). Wir

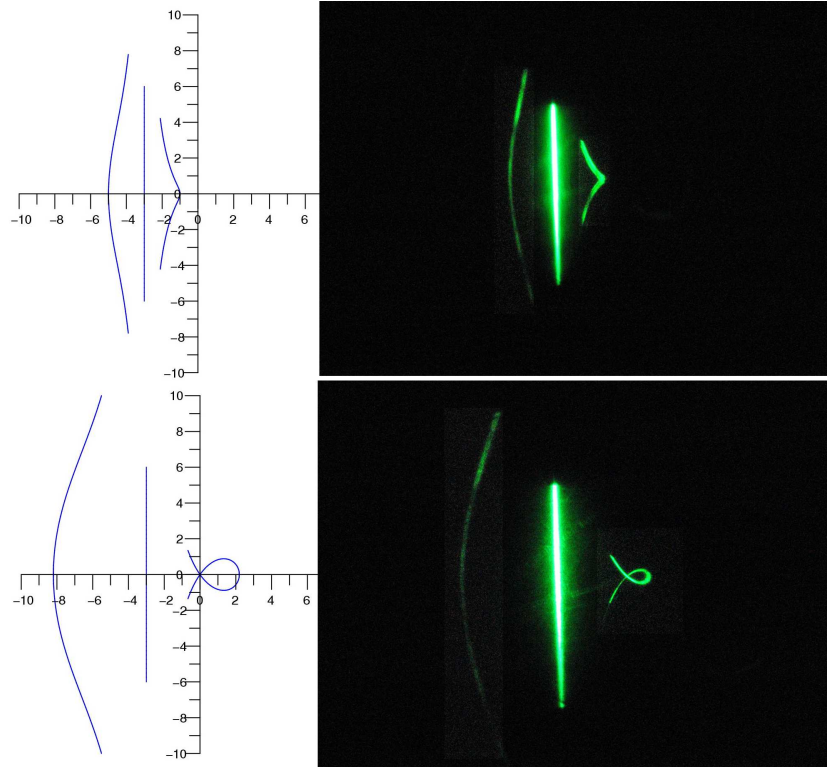


Abbildung 8.11.: **Oben:** Positionen der Nullten und der ersten Beugungsordnungen eines dünnen Spalts auf dem Schirm für den Fall $r = 3\text{ cm}$ und $L = 6\text{ cm}$.

Unten: Positionen der Nullten und der ersten Beugungsordnungen eines dünnen Spalts auf dem Schirm für den Fall $r = 3\text{ cm}$ und $L = 13\text{ cm}$. Dargestellt werden die theoretischen Positionen nach Gleichung (8.8) (links) und der tatsächlich gemessene Zusammenhang (rechts).

betrachten einen beliebigen Punkt auf dem Spalt $(-r, h)$ und berechnen die Orte der ersten Beugungsordnungen auf dem Schirm in Abhängigkeit von h , r und a . Die Verschiebungen der Beugungsordnungen dx und dy ergeben sich durch die einfache geometrische Bedingung:

$$\tan(\alpha) = \frac{h}{r} = \frac{dy}{dx} \quad (8.4)$$

Da der Abstand a der Beugungsordnungen immer konstant bleibt, gilt $dx^2 + dy^2 = a^2$ und es ergeben sich die Gleichungen:

$$dx = \frac{a}{\sqrt{\frac{h^2}{r^2} + 1}} \quad dy = \frac{a}{\sqrt{\frac{r^2}{h^2} + 1}} \quad (8.5)$$

Die Gestalt des Beugungsbildes hängt durch den Beugungswinkel und Gleichung (8.3) vom Abstand L ab.

$$\frac{L}{a} = \frac{L_0}{a_0} \quad (8.6)$$

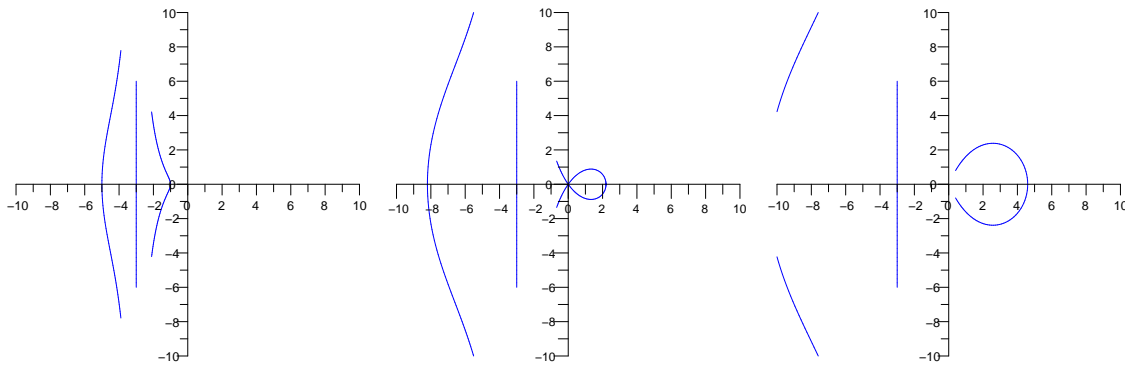


Abbildung 8.12.: Darstellung der ersten Beugungsordnungen eines dünnen Spalts an einer konzentrischen Gitterstruktur für verschiedene Schirmabstände:

Links: $L=5\text{cm}$; Die beiden ersten Ordnungen liegen dicht beieinander.

Mitte: $L=13\text{cm}$; Die rechte erste Ordnung sorgt für eine hohe Intensität in der Umgebung des Ursprungs.

Rechts: $L=19\text{cm}$; Die rechte erste Ordnung trifft nicht mehr auf den Ursprung, die linke erste Ordnung liegt außerhalb des Koordinatensystems.

Daher ergibt sich für die Verschiebung des Punktes auf dem Schirm:

$$dx = \frac{a_0 L}{L_0 \sqrt{\frac{h^2}{r^2} + 1}} \quad dy = \frac{a_0 L}{L_0 \sqrt{\frac{r^2}{h^2} + 1}} \quad (8.7)$$

Die Nullte Ordnung liegt auf dem Schirm am Ort $P_0 = (-r, h)$. Die Punkte der rechten und linken ersten Beugungsordnungen P_r, P_l sind bestimmt durch:

$$P_l = \begin{cases} (-r - dx, h - dy) & h \leq 0 \\ (-r - dx, h + dy) & h > 0 \end{cases} \quad P_r = \begin{cases} (-r + dx, h + dy) & h \leq 0 \\ (-r + dx, h - dy) & h > 0 \end{cases} \quad (8.8)$$

Durch die Beziehungen (8.8) lassen sich somit die Orte der Beugungsordnungen für jeden beliebigen Punkt des Spalts in Abhängigkeit vom Schirmabstand bestimmen. In Abbildung 8.11 wird das mit der Beziehung (8.8) berechnete und tatsächlich gemessene Beugungsbild dargestellt [11]. Die Abbildungen zeigen die Aufnahmen eines transparenten Schirms. Man kann die Position der Beugungsordnungen im Koordinatensystem in etwa abschätzen. Ermöglichen es diese Betrachtungen nun, das Auftreten des hellen Punktes in der Mitte bzw. die bündelnde Wirkung der CD zu verstehen?

Abbildung 8.12 zeigt die Situation für einen dünnen Spalt mit den Schirmabständen 5cm, 13cm und 19cm. Dies entspricht etwa der gemessenen Situation in Abb. 8.4. Die Position der ersten Ordnungen auf dem Schirm hängen maßgeblich vom Schirmabstand L ab. In erster Näherung laufen die ersten Ordnungen mit zunehmendem L weiter auseinander. In Abb. 8.12 wurden für verschiedene Schirmabstände L die Positionen der ersten Beugungsordnungen auf dem Schirm für einen dünnen Spalt berechnet. Die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment überzeugte mich zunächst, auf dem richtigen Wege zu sein. Kann die am Schnittpunkt der Lichtstrahlen entstehende Aufhellung die Ursache für die bei voller Beleuchtung der CD

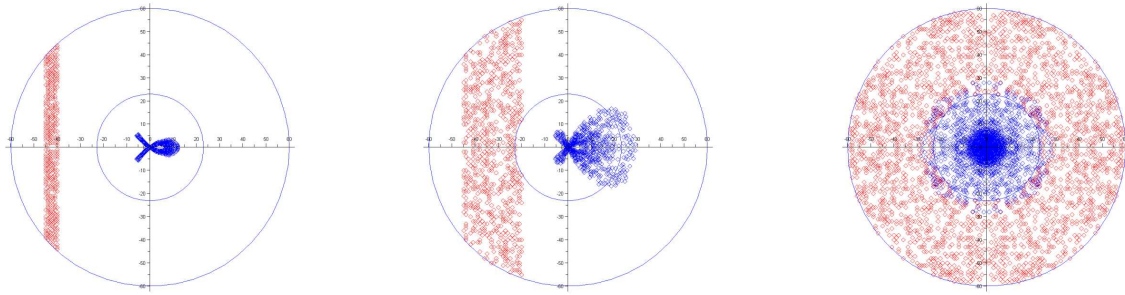


Abbildung 8.13.: Übergang von der Beleuchtung durch einen Spalt zur gesamten Ausleuchtung [11].

entstehende Brennpunkt sein? Die zur Beantwortung dieser Frage erforderliche Summation über alle möglichen senkrechten Spalte ist gedanklich nur schwer zu übersehen. Deshalb wurde eine entsprechende Simulation erstellt [11]. Das Ergebnis (Abb. 8.13 zeigt eine deutliche Ähnlichkeit mit der Beobachtung im Experiment: Eine Verbreiterung des Spalts führt zu einer Vergrößerung der Schleife, insbesondere auf der dem Spalt gegenüber liegenden Seite. Die beiden Schleifenäste schneiden sich immer im Mittelpunkt. Bei vollständiger Ausleuchtung entsteht dadurch, zwischen zwei extremalen Schirmabständen L_1 und L_2 , ein heller Bereich in der Mitte des Schirmbildes.

Obwohl diese Erklärung eine befriedigende Übereinstimmung von Simulation und Experiment liefert, gibt es dennoch einige Probleme, auf die ich bei Diskussionen mit Fachkollegen aufmerksam wurde:

Die Beugungsmuster hinter einem Gitter entstehen, im Huygens'schen Bild, durch phasenrichtige Überlagerung aller Elementarwellen, die von allen Punkten aller Gitterspalte ausgehen.

Das Ergebnis in Abbildung 8.13 erhält man einfach durch Summation aller „Lichtstrahlen“, d.h. durch Addition von Intensitäten.

Deshalb wurde in einer weiteren Simulation [5] die Berechnung der Amplitude und Phase für jeden Punkt der von der CD ausgehenden Kugelwellen vorgenommen. In jedem Punkt des Schirmes wurden dann die von allen CD-Punkten ausgehenden Elementarwellen phasenrichtig aufaddiert.

Bei einer Punktlichtquelle auf der Symmetrieachse erhielt ich bei der Simulation zwar für Punkte auf der Achse akzeptable Werte für Helligkeit und Farbe. Eine Berechnung der Intensität aller Punkte auf dem Schirm lieferte jedoch ein enttäuschendes Ergebnis. Die scharf begrenzte Helligkeit in der Mitte des Schirmbildes war nicht zu beobachten (Abb. 8.14). Sind dies Hinweise darauf, dass die Erklärung des Phänomens durch Beugung nicht möglich ist?

Prof. Dr. H.J. Schlichting gab mir einen entscheidenden Tip und zwar, dass ähnliche Phänomene wie bei der CD auch an kreisrund angeschliffenen Flächen [65] auftreten können. Daher stellte mir die Werkstatt der Universität eine Plexiglasplatte mit einem konzentrisch geschliffenen Ringmuster (Kratzer) her. Die Strukturen waren für Beugungseffekte zu groß. Und tatsächlich: Die so angeschliffene Plexiglasscheibe erzeugte, ganz ähnlich wie die CD, einen „Brennpunkt“, der sich beim Verschieben des Schirmes als „Brennlinie“ erwies (Abb. 8.15)!

In beiden Fällen entstand ein heller Punkt in der Mitte des Schirmbildes, dessen Größe von den Abstandsverhältnissen zwischen dem Schirm, der CD und der Lampe weitgehend unabhängig

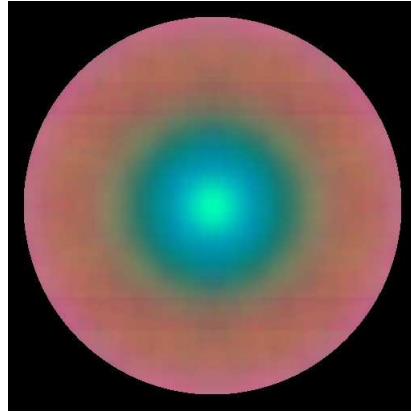


Abbildung 8.14.: Ergebnis einer Simulation der Lichtbeugung an der CD-Scheibe $g = 50m, b = 10cm$ [5].

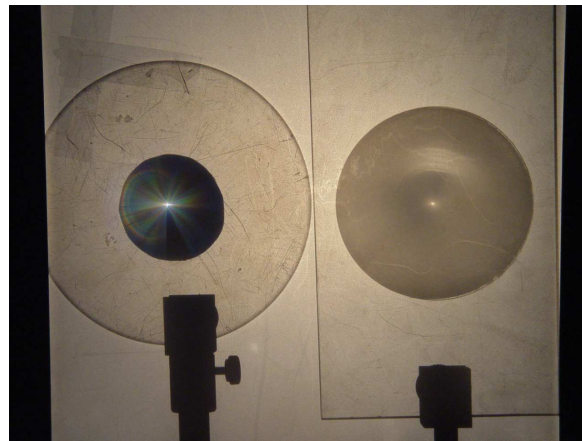


Abbildung 8.15.: Gleichzeitige Beleuchtung des CD Rohlings und der geschliffenen Plexiglasplatte mit näherungsweise parallelem Licht. Die Aufnahme zeigt das Bild auf einem transparenten Schirm.

war. Die Entstehung dieses hellen Punktes konnte mit dieser Erkenntnis nicht mehr auf Beugungserscheinungen zurückgeführt werden. Im Falle der CD entsteht der helle Punkt nur in einem begrenzten Bereich hinter der CD. Dieser wird durch die beiden Punkte $L_1 = 6cm$ und $L_2 = 15cm$ hinter der CD eingegrenzt. Bei der geschliffenen Plexiglasplatte existiert ein entsprechender Bereich nicht. Man findet den hellen Punkt bei jedem beliebigen Schirmabstand, selbst dann, wenn der Schirm mehrere Meter entfernt von der CD positioniert wird.

8.2.6. Die CD als lichtbrechendes Medium

Die Tatsache, dass auch eine kreisrund angeschliffene Plexiglasplatte nahezu die gleichen Erscheinungen auf dem Schirm erzeugte wie die CD, überzeugte mich, mit der Beschreibung des Phänomens durch Beugung offenbar „auf der falschen Fährte zu sein,. Falls entgegen aller bisherigen Annahmen doch Lichtbrechung für das Phänomen verantwortlich ist, so muss die Brechung an den Rillen erfolgen. Es galt demnach zu untersuchen, ob die Lichtbrechung im Zusammenhang mit der Rillenform zu den beobachtbaren Phänomenen führen kann.

Ich betrachtete von nun an die Führungsrille als ein System nebeneinander angeordneter Pris-

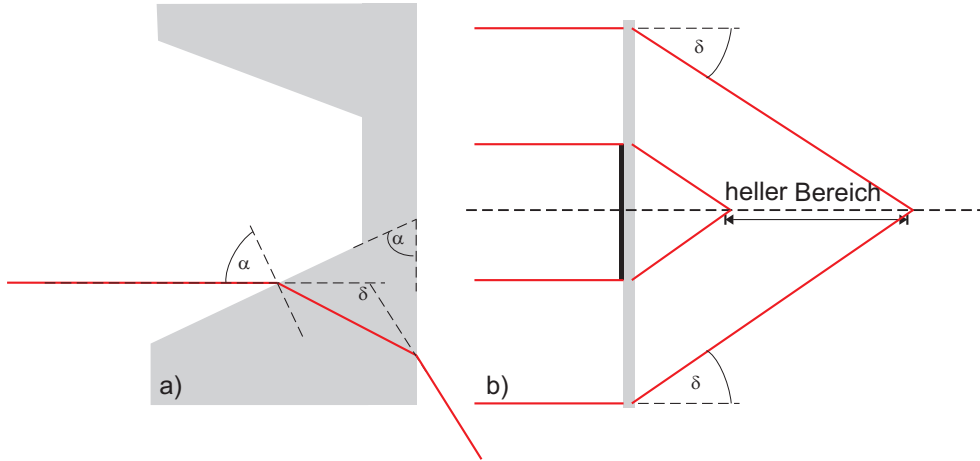


Abbildung 8.16.: a) Die Rille auf der CD entspricht einem System nebeneinander liegender Prismen, durch die das Licht gebrochen wird.
b) Der helle Bereich entsteht durch die parallel zur Achse hin gebrochenen Strahlen. Er wird durch die innersten und äußersten Strahlen begrenzt, die durch die CD fallen.

men, die einen Spitzenwinkel $\alpha = 50^\circ$ aufweisen. Für ein qualitatives Verständnis war es ausreichend, von einem parallel einfallendem Lichtbündel auszugehen. Ferner untersuchte ich nur die Lichtstrahlen, die in der Zeichenebene verlaufen. In Abb. 8.16 a wird dieser Sachverhalt dargestellt. Der unter einem Einfallswinkel Θ einfallende Lichtstrahl wird an der Unterkante der Rille zweimal gebrochen, und verlässt „das Prisma“ in einem Ablenkungswinkel von δ . Da die auf die obere Kante der Rille treffenden Lichtstrahlen in jedem Fall von der optischen Achse weg gebrochen werden, sind diese für die Argumentation nicht von Belang. Dies gilt für jede Rille und daher für jeden Radius auf der CD. Setzt man für die qualitative Beschreibung achsenparalleles Licht voraus, so ergibt sich die in Abb. 8.16 b dargestellte Situation. Da sich alle Lichtstrahlen innerhalb eines festen Bereiches kreuzen, erscheint dieser Bereich für den Betrachter besonders hell und man erkennt einen hellen Punkt, wenn der Schirm innerhalb dieses Bereiches gestellt wird. Die äußersten Begrenzungspunkte dieses Bereiches werden durch die beiden Randstrahlen festgelegt. All diese Argumente gelten für die Plexiglasplatte in gleicher Weise, jedoch mit dem Unterschied, dass die Brechung bei der Plexiglasplatte an kreisrund geschliffenen Rillen erfolgt, deren Neigungswinkel keinen einheitlichen Wert besitzen. Aus diesem Grund ist der helle Bereich bei der Plexiglasplatte nicht begrenzt. Der Ablenkungswinkel ergibt sich durch die Beziehung:

$$\delta = \theta + \arcsin \left[\sin(\alpha) \left(\frac{n^2}{n_L^2} - \sin^2(\theta) \right)^{1/2} - \sin(\theta) \cos(\alpha) \right] - \alpha \quad (8.9)$$

Gleichung (8.9) ergibt sich durch einfache geometrische Zusammenhänge. Für eine ausführliche Ableitung verweise ich auf einschlägige Lehrbücher der Optik wie z.B. Hecht [29]. Der Brechungsindex von Polycarbonat beträgt im sichtbaren Bereich etwa $n = 1,59$ [14]. Mit diesen Werten erhielt ich für achsenparalleles Licht und dem Brechungsindex von Luft $n_L = 1$ die beiden theoretisch berechneten Punkte $L_1 = 3,7\text{cm}$ und $L_2 = 9,5\text{cm}$. Obwohl diese Werte sicherlich qualitativ mit dem Experiment übereinstimmen, reicht diese Beschreibung für ein

vollständiges Verständnis der Phänomene noch nicht aus.

Gleichung (8.9) ist in dieser Form ungültig, wenn die Lichtstrahlen nicht in der Zeichenebene verlaufen. Daher sah ich im nächsten Schritt von einer Näherung mit parallelem Licht in der Zeichenebene ab und betrachtete die Beleuchtung der CD unter schief einlaufenden Lichtbündeln, sowie mit ausgedehnten Lichtquellen.

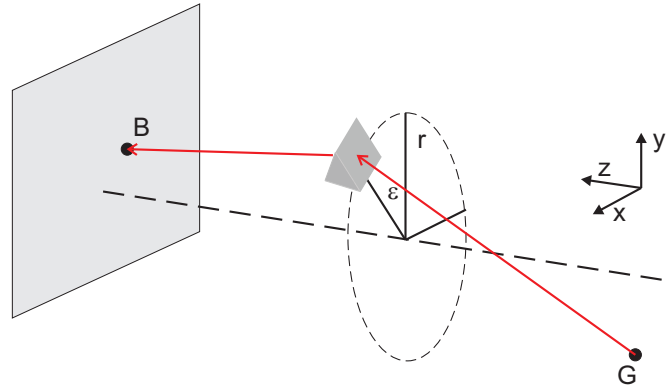


Abbildung 8.17.: Die CD wird von einer Punktlichtquelle beleuchtet. Die Punktlichtquelle befindet sich irgendwo im Raum. Ein von ihr ausgehender Lichtstrahl trifft die Rille in einem Winkel ϵ .

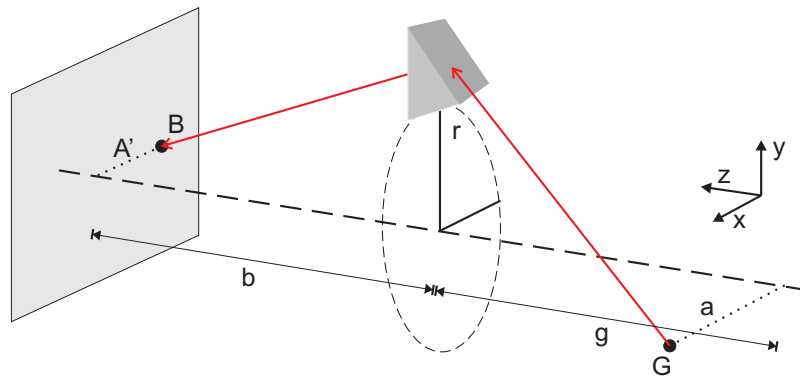


Abbildung 8.18.: Strahlengang durch Brechung an der Führungsrille, wenn sich die Punktlichtquelle in der xz -Ebene befindet. Da der Lichtstrahl jetzt schief durch das Prisma verläuft, ist Gleichung (8.9) in diesem Fall nicht mehr gültig.

Der Übergang von einer Punktlichtquelle zu einer ausgedehnten Lichtquelle geschah dadurch, dass die ausgedehnte Lichtquelle als eine Gesamtheit von Punktlichtquellen betrachtet wurde. Eine Punktlichtquelle (Abb. 8.17) befindet sich an einem beliebigen Ort im Raum und beleuchtet die CD. Die Auftreffpunkte aller Lichtstrahlen auf einem Schirm, die an einem bestimmten Punkt auf der CD (r, ϵ) gebrochen werden, sollten bestimmt werden. Die Brechung findet an der Führungsrille statt, die wir gemäß Abbildung 8.16 durch ein Prisma beschreiben. Befindet sich die Lichtquelle auf der optischen Achse, und betrachten wir nur die Punkte mit $\epsilon = 0$, so verläuft der Lichtstrahl immer in der yz -Ebene, in der auch die optische Achse verläuft. Verschiebt man die Lichtquelle nun in x -Richtung um eine Strecke a , so verschiebt sich der Punkt auf dem Schirm aufgrund der Symmetrie entsprechend entgegengesetzt um die Strecke

α' . Dadurch verläuft der Lichtstrahl nicht mehr in der xz -Ebene, und für die Berechnung des Ablenkungswinkels gilt Gleichung (8.9) nicht mehr in dieser einfachen Form. Durch den schiefwinkligen Einfall auf das Prisma gibt es eine effektive Vergrößerung des Einfallswinkels, die zu einer Änderung des Ablenkungswinkel führt. Der funktionale Zusammenhang hat, für ein Glasprisma mit einem Spitzenwinkel von 50° , ein Minimum bei einem Einfallswinkel von 40° . In dieser Anordnung führt demnach eine kleine Änderung des Einfallswinkels praktisch zu keinen Auswirkungen in Bezug auf den Ablenkungswinkel. Aus diesem Grund kann die Näherung des geradlinigen Lichteinfalls, bei der eine effektive Vergrößerung des Einfallswinkels durch schiefen Lichteinfall keine Auswirkung auf den Ablenkungswinkel hat, herangezogen werden. Allerdings lag in der diskutierten Anordnung dieser Fall praktisch nicht vor, da bei achsenparallelen Licht der Einfallswinkel bereits α entspricht.

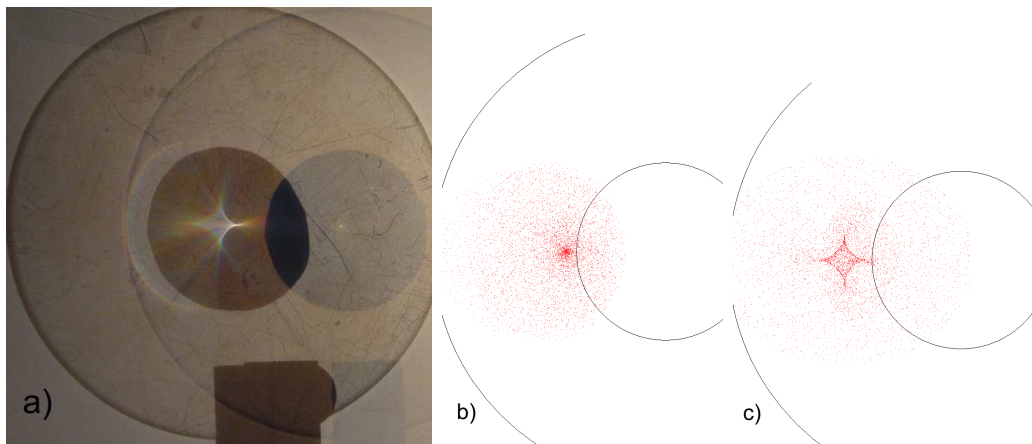


Abbildung 8.19.: Numerische Berechnung des Schirmbildes einer in der xz -Ebene mit $a'=20\text{cm}$ befindlichen Punktlichtquelle vor einer CD:

a) Experimentelles Ergebnis b) Numerisches Ergebnis mit Näherung geraden Einfalls c) Numerisches Ergebnis bei korrekter Rechnung

Während der Strahlverlauf bei Spezialfällen hoher Symmetrie ($\epsilon = 0$, Strahl in xy -Ebene u.a.) noch einigermaßen leicht vorstellbar ist, ergaben sich in allgemeineren Fällen wie Abbildung 8.17 Schwierigkeiten. In diesem Fall müssen numerische Lösungen herangezogen werden. Es wurde ein Programm erstellt, welches mit Hilfe von Raytrace-Routinen, den Strahlengang durch ein kreisförmiges Prisma bestimmt [5]. Die Lichtquelle und der Schirm konnten entsprechend Abbildung 8.17 beliebig im Raum positioniert werden. Das Programm bestimmte für einen zufällig ausgewählten Lichtstrahl, der von der Lampe ausgeht, den Brechungsstrahl des von der CD getroffenen Prismas. Der Punkt, an dem der Brechungsstrahl auf den Schirm trifft, wurde markiert. Besonders interessant ist dabei der schiefwinklige Lichteinfall, der im Experiment zu einer rosettenartigen Lichterscheinung auf dem Schirm führt. In einem ersten Versuch wurde die Berechnung unter der Näherung des geradlinigen Lichteinfalls durchgeführt. Das Programm geht dann davon aus, dass jeder Strahl geradlinig durch das Prisma verläuft (Gleichung (8.9)). Das Ergebnis der Simulation war enttäuschend: Die rosettenartige Lichtstruktur, die im Experiment zu beobachten ist (Abb. 8.19 a), trat bei dieser Näherung nicht auf (Abb. 8.19 b). Erst eine exakte Rechnung⁴, in der der schiefwinklige Lichteinfall in das Prisma berücksichtigt

⁴Der effektive Einfallswinkel wird dabei durch analytische Geometrie mit Hilfe des Skalarproduktes von Einfalls- und Flächennormalvektoren bestimmt.

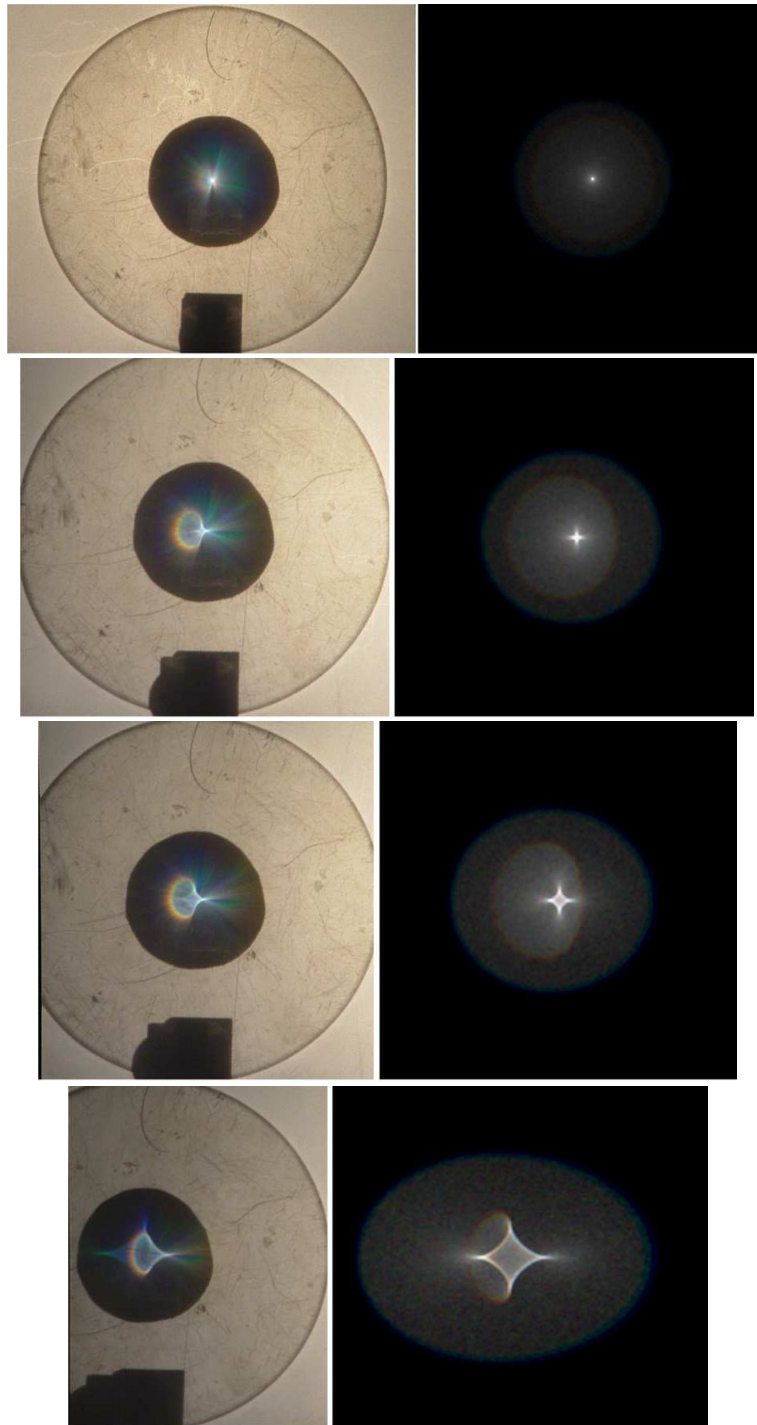


Abbildung 8.20.: Übergang des hellen Punktes zu einer rosettenartigen Struktur bei schiefwinkeligem Lichteinfall auf die CD im Experiment und bei Simulation. Die Abstände betrugen: Lampe-CD: $g=600\text{mm}$ und CD-Schirm: $b=75\text{mm}$. Der Einfallswinkel α wurde variiert: (von oben nach unten) $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ und $\alpha = 25^\circ$. Die Simulation berechnet die Lichtbrechung für drei Einzelbilder mit drei Wellenlängen (Rot, Grün und Blau), die dann zu einem Gesamtbild (Weiß) überlagert werden [5].

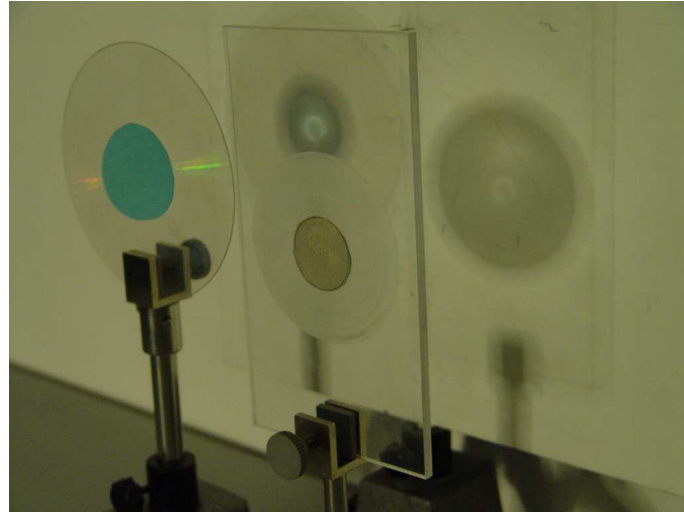


Abbildung 8.21.: Abbildung einer Ringleuchte mit einer CD und einer kreisförmig angeschliffenen Plexiglasplatte für den Fall, dass eine Punktlichtquelle die CD in einem schiefen Winkel (20°) beleuchtet. Der Abstände betragen: $g = 150\text{cm}$ und $b = 9,5\text{cm}$.

wurde, erwies sich als erfolgreich. In Abbildung 8.19 c zeigt sich die rosettenartige Struktur auch in der Simulation. Im nächsten Schritt folgte eine systematische Untersuchung, in der das Schirmbild bei konstantem Lampenabstand für den schiefen Lichteinfall fotografiert und mit der Simulation verglichen wurde. Es zeigte sich das in Abbildung 8.20 a bis d dargestellte Ergebnis. Offensichtlich beschreibt die Simulation mit der exakten Rechnung das Experiment hinreichend gut. Dies gilt für jeden Ort der Punktlichtquelle, insbesondere auch dann, wenn sie sich nicht auf der optischen Achse befindet.

Der Übergang zu einer ausgedehnten Lichtquelle war daraufhin einfach. Das Schirmbild setzte sich aus der Summe der Bilder einzelner Punktlichtquellen zusammen.

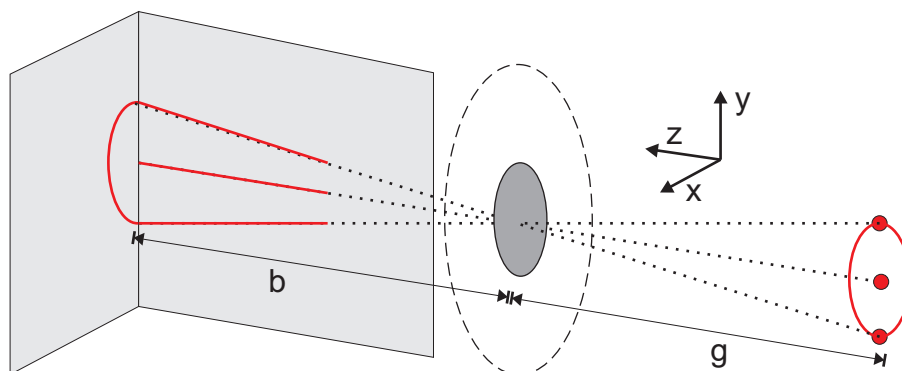


Abbildung 8.22.: Befindet sich die Punktlichtquelle außerhalb der optischen Achse, so liegen die zugehörigen Bildlinien auf einem Kegelmantel.

8.2.6.1. Abbildung einer Ringleuchte mit einer CD

Ich untersuchte nun die Abbildung einer ausgedehnten Lichtquelle. Dazu verwendete ich eine Ringleuchte mit einem Durchmesser von 20cm, die gleichzeitig die nebeneinander stehende CD und die Plexiglasplatte Abbildung 8.15 beleuchtete. Die Abbildungen von der Ringleuchte an der Wand waren in beiden Fällen nahezu identisch. Dies galt insbesondere für die Größe des Bildes. Das Bild lässt sich sowohl bei der CD, als auch bei der Plexiglasplatte nur in einem bestimmten Abstandsbereich (etwa $4,5\text{cm} \leq b \leq 14\text{cm}$) beobachten. Auffällig bei der CD war ein deutlicher Farbsaum, der das Bild der Ringleuchte an der Wand umgab. Befand sich die CD nahe an der Wand $b \approx 4,5\text{cm}$; $b < 4,5\text{cm}$ so erschien das Bild leicht rötlich, während es bei größerer Entfernung $b \approx 14\text{cm}$; $b > 14\text{cm}$ ins Bläuliche überging. Dies lässt sich nicht durch Dispersion erklären, da der Brechungsindex von Glas, und damit auch der Ablenkungswinkel, bei kleiner werdenden Wellenlängen größer wird. Blaues Licht müsste dann stärker gebrochen und somit bei kleinen Abständen zu finden sein. Da dies offensichtlich nicht der Fall war, musste Dispersion als Ursache für diesen Effekt ausgeschlossen werden. Es konnten jedoch zusätzlich Beugungsphänomene zum Tragen kommen. Der Sinus des Beugungswinkels ist proportional zur Wellenlänge und damit wird rotes Licht stärker gebeugt als blaues Licht. Die oben genannten Farbsäume bei der CD können daher nur auf Beugung zurückzuführen sein. Die Tatsache, dass die Farbsäume bei der Plexiglasplatte nicht auftraten, deuten ebenfalls darauf hin. Hier sind die Strukturen einfach so groß, dass keine Beugung beobachtbar ist. Aufgrund von Lichtbrechung an den wie Prismen wirkenden inneren Flanken der Rillen wird das Licht einer Punktlichtquelle, die sich auf der optischen Achse befindet, um einen Winkel δ zu dieser hin abgelenkt. Dieser Winkel ist bei der CD für alle Rillen gleich groß. Durch diese Fokussierung entsteht hinter der CD auf der optischen Achse eine relativ scharf begrenzte helle Linie, die Bildlinie. Sie hat einigermaßen eindeutig definierte Anfangs- und Endpunkte. Bei der Plexiglasplatte ist diese Linie viel weniger scharf begrenzt. Bei der CD hängen die Anfangs- und Endpunkte der Bildlinie mit dem Winkel der Rillenflanken und dem Brechungsindex des Scheibenmaterials zusammen. Rückt die Punktlichtquelle von der optischen Achse weg, so entsteht weiterhin eine Bildlinie, deren Schärfe jedoch mit zunehmendem Einfallswinkel schnell abnimmt. Die Bildlinie ändert ihre Richtung so, dass die Mitte der Scheibe und die Lampe auf ihrer Verlängerung liegen. Die Entstehung der Bildlinie ist anschaulich nicht mehr zu verstehen. Sie kann höchstens mit Stetigkeitsargumenten aus der achsensymmetrischen Situation abgeleitet werden. Obige Aussagen gelten in gleicher Weise für die kreisförmig zerkratzte Scheibe. Allerdings hat hier jeder Ring seinen eigenen Flankenwinkel. Wenn man annimmt, dass diese Winkel nicht zu stark um einen Mittelwert streuen, führt die Brechung an den Flanken lediglich zu einer schlechteren Fokussierung auf die Bildlinie und zum Verschwinden ihrer Begrenzungspunkte. Die Abbildung wird kontrastärmer.

8.2.7. Simulation des Ringleuchtenbildes

Zur abschließenden Überprüfung der Modellbeschreibung mit dem Experiment, sollte noch das Abbild einer Ringleuchte simuliert werden. Die Ringleuchte wurde in der Simulation [5] durch eine kreisförmige Anordnung von Punktlichtquellen ($r = 10\text{cm}$) konstruiert. Die Berechnung erfolgte durch die im vorangegangenen Kapitel diskutierte Modellbeschreibung.

Das Licht wird bei der Plexiglasplatte an zufälligen Kratzstrukturen gebrochen. Diese wurden in der Simulation durch zufällige Variation des Spitzenwinkels der Prismen erzeugt. Bei der CD blieb der Spitzenwinkel konstant. Abbildung 8.23 zeigt das Ergebnis der Simulation. Der Unter-

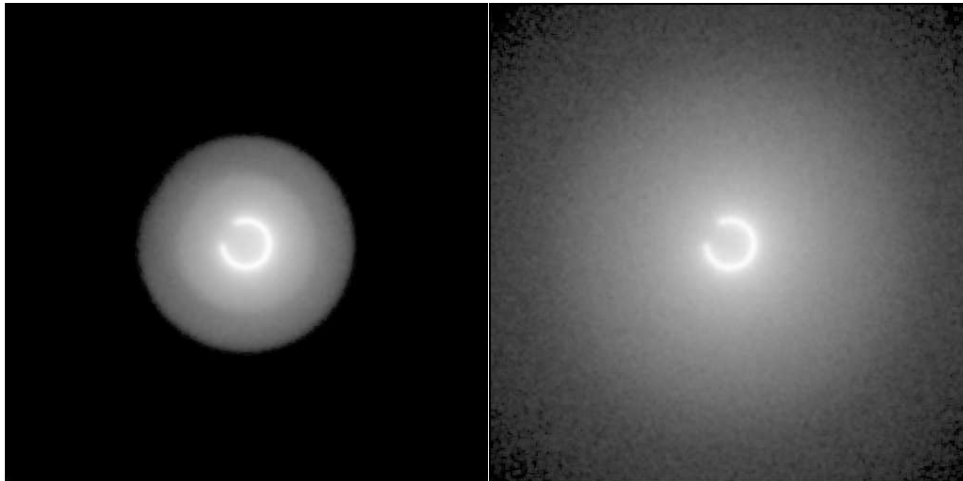


Abbildung 8.23.: Simulation der Abbildung einer Ringleuchte durch eine CD durch Rot-, Grün-, Blau-Überlagerung [5]. Das linke Bild zeigt die Rechnung mit einheitlichem Spitzenwinkel der Prismen (CD). Bei der Plexiglasplatte wurde eine statistische Streuung des Spitzenwinkels zugelassen (rechtes Bild). Die Abbildung ist hier etwas kontrastärmer.

schied besteht im Wesentlichen darin, dass das rechte Bild (Plexiglasplatte) etwas kontrastärmer (unschärfer) ist als das linke Bild (CD). Die entstehenden Abbildungen der Ringleuchte sind bei der CD und der Plexiglasplatte weitgehend identisch. Im Experiment beobachtete man diese Situation, wenn sich der Schirm innerhalb eines Abstandes von 4,5cm bis 14cm befand. Die Simulation lieferte mit den bekannten Parametern ($n = 1,59, \alpha = 50^\circ$) oberhalb von 10cm Abstand kein Bild mehr. Dies ist wahrscheinlich auf die Parameter n, α zurückzuführen, deren Werte der Literatur entnommen wurden. Der Einfluss des Brechungsindex ist im Vergleich zu dem des Spitzenwinkels nur sehr gering. Daher ist es am wahrscheinlichsten, dass die Diskrepanz zu den experimentell gefundenen Daten auf den Wert des Spitzenwinkels zurückzuführen sind. Setzt man für den Spitzenwinkel einen Wert von 40° an, so stimmen die simulierten Daten mit den experimentell gefundenen besser überein⁵

8.3. Oberflächenuntersuchung des CD-Rohlings

Die Modellbeschreibung durch Brechung des Lichts an den Rillenkanten der CD liefert besonders übereinstimmende Ergebnisse mit dem Experiment, wenn für den Neigungswinkel der Rillenkanten $\alpha = 40^\circ$ angenommen wird. Dies entspricht einer Abweichung zur Literaturangabe um 10° (vgl. [85] $\alpha = 50^\circ$). Daher war ich mutig genug, dem Modell eine hinreichend gute Gültigkeit zu bescheinigen und der Literaturangabe in [85] eine entsprechend große Ungenauigkeit zu unterstellen. Der „wahre“ Wert von α sollte nun experimentell ermittelt werden. Dabei bekam ich Unterstützung von der Arbeitsgruppe von Frau Prof. Schleeberger aus dem Laboratorium für Experimentalphysik an der Universität Duisburg-Essen. Die Gruppe beschäftigt sich mit der Oberflächenanalyse verschiedener Materialien mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie (AFM). Eine Mitarbeiterin der Arbeitsgruppe untersuchte die Oberfläche des CD-Rohlings und erstellte mehrere Aufnahmen der Topographie.

⁵Aus diesem Grund wurde auch für die Berechnung in Abb. 8.23 ein Spitzenwinkel von 40° vorausgesetzt.

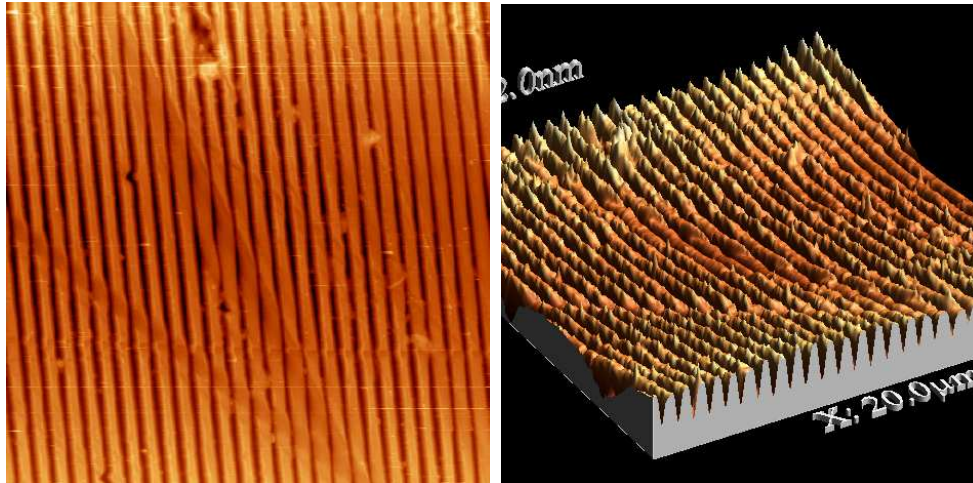


Abbildung 8.24.: Aufnahme eines 20x20 Mikrometer Ausschnitts der Oberfläche unseres CD-Rohlings mit einem Rasterkraftmikroskop. Das rechte Bild zeigt eine dreidimensionale Topographie des linken Bildes.

Bei der Rasterkraftmikroskopie (Atomic Force Microscope) fährt eine sehr feine Nadel (Durchmesser im Ångström-Bereich) über die Oberfläche der Probe. Dabei hebt und senkt sich die Nadel je nach Beschaffenheit des Untergrundes. Die Bewegung der Nadel in z-Richtung wird über eine optische Abtastung gemessen.

Die Nadel des AFM rastert die Oberfläche der CD zeilenweise ab. Gleichzeitig wird die Information über die Höhenänderung der Nadel von der Software gespeichert. Aus beiden Informationen lassen sich zwei, oder sogar dreidimensionale Bilder der Oberflächenstruktur generieren.

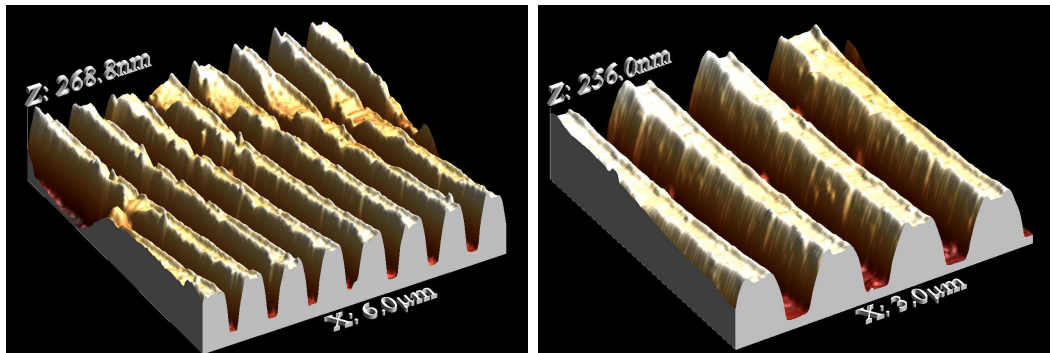


Abbildung 8.25.: **Links:** 6x6 Mikrometer Ausschnitt der dreidimensionalen Topographie der CD-Oberfläche.
Rechts: 3x3 Mikrometer Ausschnitt der dreidimensionalen Topographie der CD-Oberfläche.

Im rechten Bild in Abbildung 8.25 lässt sich bereits das Dilemma erahnen. Der Flankenwinkel der Rillenkanten scheint sehr groß zu sein. In jedem Fall ist er nicht kleiner als 50° , wie ich es mir eigentlich erhofft habe, sondern deutlich größer. Der genaue Wert des Winkels lässt sich ebenfalls sehr leicht von der Software des AFM bestimmen, indem die Querschnittsfläche der Rillen (senkrecht zu deren Verlauf) betrachtet wird. Der Winkel kann mit Hilfe der Breiten- und Höhenangaben bestimmt werden. Er beträgt: $\alpha_{mess} = 70^\circ$. Welche Konsequenzen ergeben sich aus diesem Ergebnis?

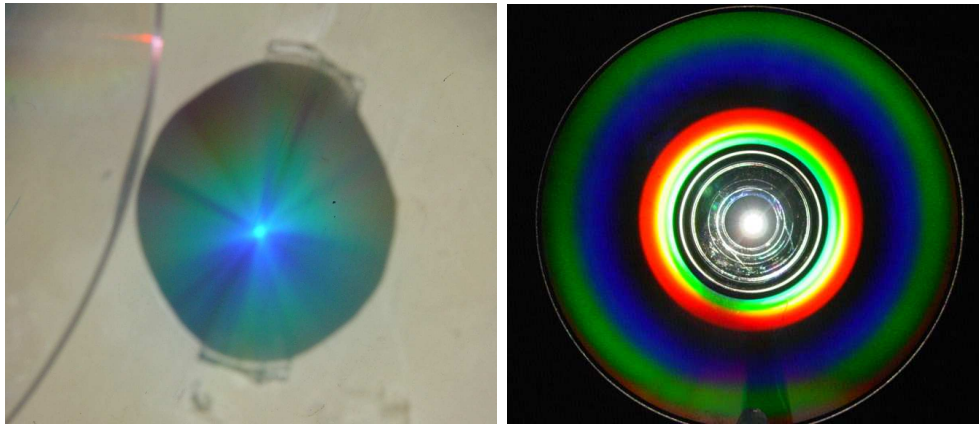


Abbildung 8.26.: **Links:** Der Lichthof um den Brennpunkt herum weist eine radiale Struktur auf, die je nach Abstand farbig erscheint. Die Farbreihenfolge bei Vergrößerung des Abstandes lässt vermuten, dass es sich hierbei um ein Beugungsphänomen handelt.

Rechts: Die CD wird mit einer Punktlichtquelle beleuchtet. Der Betrachter blickt aus Sicht des Schirms in Richtung der Lampe/CD. Bei einem bestimmten Abstand kann man ein kreisförmiges Spektrum erkennen. Beim genaueren Hinsehen erkennt man außen noch ein weiteres Spektrum. Dabei handelt es sich um die zweite Beugungsordnung.

- **Erneute Simulation mit $\alpha_{mess} = 70^\circ$:** Werden die Simulationen der Abbildungen einer Punktlichtquelle oder der Ringleuchte mit dem neuen Flankenwinkel $\alpha_{mess} = 70^\circ$ wiederholt, so ändert sich an den prinzipiellen Abbildungserscheinungen nur wenig. Lediglich die Lage und Länge der „Brennlinien“ verschieben sich ein wenig zu größeren Werten hin.
- **Die Modellvorstellung ist noch unvollständig.** Es müssen noch mögliche, für das Phänomen wesentliche Aspekte unberücksichtigt sein. Eine Idee dazu war der Brechungsindex des Kunststoffmaterials (auch hier liegen nur bedingt verlässliche Werte vor), dessen Einfluss auf das Phänomen mir aber zu gering erscheint.
- **Die Modellvorstellung ist noch immer falsch.** Die Theorie muss möglicherweise gänzlich durch eine neue ersetzt werden. Obwohl dieser Punkt nicht ausgeschlossen werden kann, halte ich beispielsweise die Simulationsergebnisse in Abbildung 8.20 für ein einschlägiges Gegenargument. Die in diesem Fall hervorragende Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment wäre dann reiner Zufall.

8.4. Fazit

Nachdem ich nun am Ende an einem Punkt angelangt war, an dem ich glaubte, das Phänomen der „Abbildung an einer durchsichtigen CD-Scheibe“ überwiegend verstanden zu haben, machte ich mir lange Zeit Gedanken darüber, ob und inwieweit man Studierenden das Phänomen in einem offenen Experimentierseminar zugänglich machen kann oder sollte. Wenn man auf meinen „Weg der Erkenntnisgewinnung“ beim Experimentieren an diesem Phänomen zurückblickt, so zeigt sich ein sehr vielfältiger, langer und auch von vielen Irrwegen und Sackgassen geprägter Erkenntnisweg. Diese Eigenschaft ist zwar aus meiner Sicht für ein offenes Experimentierseminar von großem Wert, allerdings bin ich auch der Ansicht, dass sowohl Studierende

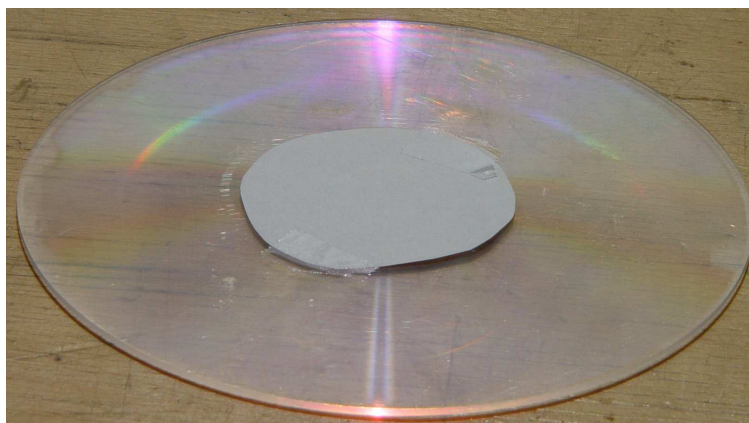


Abbildung 8.27.: Optische Phänomene an einer durchsichtigen CD-Scheibe. In der mitte erkennt man das helle (weiße) Lichtschwert und im oberen hinteren Bereich ein azimuthales Spektrum an der Oberfläche der CD.

als auch ausgebildete Lehrer kaum eine Chance haben, diesen (oder einen vergleichbaren) Weg zu beschreiten.

1. Das Phänomen ist zu komplex. Die beobachtbaren Aspekte, wie die Abbildung an der CD oder andere beobachtbare Phänomene, sind nur durch aufwändige Modellvorstellungen erklärbar. Daher haben die Studierenden oder die Lehrer nicht die Möglichkeit, durch einfachere Untersuchungen und qualitative Beschreibungen, befriedigende Erklärungsansätze zu formulieren.
2. Die Bearbeitungszeit im Seminar/Praktikum ist zu kurz. Die Tatsache, dass ich mich etwa *ein halbes Jahr* mit der „Bildentstehung an einer durchsichtigen CD“ beschäftigt habe bzw. beschäftigen musste, um zu einem aus meiner Sicht adäquaten Verständnis zu kommen, zeigt ebenfalls, dass das Phänomen sich nicht für ein offenes Praktikum eignen kann.
3. Neben der Bildentstehung und der bündelnden Wirkung gibt es aus meiner Sicht zu wenige weitere Aspekte, die mit einfacheren Mitteln und Wegen untersucht werden können.

Beim Experimentieren mit den durchsichtigen CD-Scheiben fielen mir eine Reihe weiterer Aspekte auf, die untersucht werden können. Allerdings deuten meine Beobachtungen darauf hin, dass auch diese Aspekte wahrscheinlich auf Brechung von Licht an den Rillenkanten oder auf Beugung zurückzuführen sind.

- Betrachtet man die CD im reflektierten oder im durchscheinenden Licht einer Punktlichtquelle, so lassen sich intensive Spektren, die unter bestimmten Umständen nahezu perfekte Kreisform annehmen, beobachten.
- Bei der Abbildung der Ringleuchte tauchen (manchmal) deutlich sichtbare Farbränder auf.
- Im manchmal auch bunten Saum um die Brennlinie ist eine radiale Struktur nicht zu übersehen.

- Manchmal beobachtet man auch, neben Lichtschwertern, ein azimutales Spektrum ([73, 74, 27]).

Aufgrund meiner langen und intensiven Auseinandersetzung mit diesem Phänomen musste ich mich in eine Vielzahl physikalischer Gebiete (neu) einarbeiten und auch „Rückschläge“ erleiden. Ich bin daher der Ansicht, dass der Weg des Erkenntnisprozesses auch für einen Außenstehenden von großem Wert sein kann (siehe auch [13]). Das Phänomen als solches halte ich dennoch nach meiner Erfahrung nicht als Ausgangsphänomen für ein offenes Praktikum für geeignet (obwohl ich es durchaus ansprechend und interessant finde).

Zusammenfassung und Ausblick

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit bestand in der Zusammenstellung und Erforschung physikalischer Ausgangsphänomene für eine naturwissenschaftlich-experimentelle Arbeitsweise und deren erster Erprobung in der Praxis. Diese Zielsetzung hat ihren Ursprung in den vielfach diskutierten Defiziten der experimentellen physikalischen Ausbildung bzw. des Experimentalunterrichts. Aufgrund „rezeptartig“ festgelegter Arbeitsabläufe agieren Lernende beim Experimentieren zu wenig selbständig und besitzen kaum adäquate Vorstellungen über die „Natur der Naturwissenschaften“. Dies zeigt sich unter anderem darin, dass die Physik als streng reglementiert angesehen und Forschungsprozesse nicht für kreativ gehalten werden. Lernende sollen mit Hilfe der Ausgangsphänomene angeregt werden, Fragen zu formulieren und eigene experimentelle Untersuchungen durchzuführen. Dabei soll gewährleistet sein, dass

1. die Lernenden sich selbständig mit dem Phänomen auseinandersetzen,
2. das Phänomen zu kreativen Untersuchungsmethoden herausfordert,
3. die physikalische Beobachtungsgabe der Lernenden herausgefordert wird und
4. die Lernenden eigene Untersuchungsziele formulieren und ihnen mit Hilfe experimenteller Strategien nachgehen.

Die Erforschung der Ausgangsphänomene beinhaltet die Erschließung des experimentellen und theoretischen Umfeldes. Dabei wurde untersucht, welche physikalischen Aspekte sich an diesen Phänomenen beobachten und untersuchen lassen und welche Untersuchungen mit welchen Methoden man anstellen könnte, um Erkenntnisse über diese Aspekte des Phänomens zu erlangen. Außerdem wurden erste Erfahrungen mit Studierenden und ausgebildeten Lehrern gesammelt. Dabei ging es darum zu erfahren, welche Fragestellungen und Untersuchungsziele sie formulieren, welche Untersuchungen sie durchführen und zu welchen Schlussfolgerungen sie dabei kommen.

Im ersten Teil der Arbeit (Kapitel 3) wurden anhand von drei „Erprobungs-Phänomenen“ erste Erfahrungen gesammelt, mit welchen Ideen und Untersuchungsmethoden Studierende an solche Ausgangsphänomene herangehen. Dabei handelte es sich um Phänomene, die bereits in der Vergangenheit ausgiebig untersucht und diskutiert wurden. Ich wählte die Erprobungs-Phänomene nach folgenden Kriterien aus:

1. Der (erforderliche) fachliche Hintergrund sollte nicht zu anspruchsvoll sein.
2. Das Phänomen sollte in erster Linie zu physikalischen Beobachtungen und Erklärungsversuchen anregen.
3. Messungen, die im Zusammenhang mit diesen Phänomenen durchgeführt werden können, sollten nicht zu anspruchsvoll und komplex sein.

Das Phänomen *Schwimmende Heftzwecken* in Kapitel 3.3 fordert die Studierenden bei der Vorführung zunächst zu „genauen Beobachtungen“ auf. Bei der Vorführung des Phänomens ergeben sich zahlreiche Aspekte und Variationsmöglichkeiten. Insbesondere deshalb war meine große Sorge, dass die Teilnehmer bei dieser großen Fülle von Teilphänomenen schnell den Überblick verlieren. Dies hat sich nicht bestätigt. Im Gegensatz zu anderen Ausgangsphänomenen waren die Studierenden hier nicht bestrebt, gleich zu Beginn ihrer Untersuchungen quantitative Messungen durchzuführen. Die (möglichen) fachlichen Aspekte (z.B. Elektrostatik oder Oberflächenspannung) wurden im Vorfeld in Grundlagenvorlesungen diskutiert. Das Ausgangsphänomen *Schwimmende Heftzwecken* ist aus diesen Gründen besonders für den „Einstieg“ in eine offene experimentelle Arbeitsweise geeignet. Das gilt besonders für Studierende, die eine weniger physikalisch experimentell ausgerichtete Ausbildung genießen (z.B. Primarstufe). Das Ausgangsphänomen *Seltsamer Stromkreis* in Kapitel 3.1 greift ebenfalls (für die Teilnehmer unmittelbar ersichtlich) theoretische Zusammenhänge aus den Grundlagenvorlesungen auf. Allerdings sind in diesem Fall die (möglichen) messtechnischen Ansprüche an die Studierenden bedeutend höher als bei dem Phänomen *Schwimmende Heftzwecken*. Es wurden grundsätzliche Fehler bei der Herangehensweise in bestimmten (Mess-)Situationen gemacht (Abschnitt 3.1.1.5). Dadurch entstanden für die Teilnehmer nicht erklärbare Abweichungen zwischen „Vorhersage“ und „Experiment“. In diesem Zusammenhang waren die Teilnehmer auf Anregungen von mir angewiesen (Abschnitt 3.1.3). Trotzdem ist dieses Phänomen ebenfalls für den Einstieg in eine offene Arbeitsweise geeignet. Es bietet zwar nach meiner Erfahrung eine eher überschaubare Anzahl an möglichen Untersuchungspfaden, die sich aber relativ leicht sowohl qualitativ als auch durch quantitative Messungen untersuchen lassen.

Der Einsatz der *Rollbahn* in Kapitel 3.2 hat sich im Seminar nicht so sehr bewährt. Das zu beobachtende Phänomen, dass die eine Kugel früher das Ziel erreicht, obwohl sie eine längere Strecke zurücklegt, wurde von den meisten Studierenden sehr schnell (meiner Meinung nach zu schnell) durchschaut. In der Praxis zeigte sich, dass dieses Phänomen nur wenige Untersuchungsaspekte in unterschiedliche Richtungen bietet. Dies muss zwar für sich allein noch nicht unbedingt ein Nachteil sein, hinzu kommt aber noch die Tatsache, dass sich der praktische Umgang mit den Bahnen als schwierig erwies. Es gibt insgesamt nur sehr wenige variierbare Parameter, und von den Studierenden oft durchgeführte quantitative Messungen lieferten nicht reproduzierbare Resultate. Wegen der Kombination von all diesen Punkten halte ich das Phänomen nicht besonders für eine offene Experimentierweise für geeignet.

Als ich dem Phänomen der *Rotierenden Farbscheibe* in Kapitel 4 zum ersten Mal in einem Science Museum begegnete, empfand ich es zwar als sehr interessant und ästhetisch, hatte aber noch keine Vorstellung darüber, wie viel zeitaufwändige und komplexe Untersuchungen es von mir in der kommenden Zeit erfordern würde. Beispielsweise zeigt sich, dass die Scheibe im Experiment nicht in jedem Punkt dieselbe Färbung hat, sondern einen kontinuierlichen Farbübergang von innen nach außen zeigt. Viele Aspekte des Phänomens werden von den experimentierenden Gruppen einfach nicht wahrgenommen (z.B. Abschnitt 4.3.2). Dabei sollte der

Lehrende nicht vergessen, dass diese Aspekte erst durch einen entsprechend großen Überblick und viel Hintergrundwissen „offensichtlich beobachtbar“ werden. Schwierigkeiten messtechnischer Art kamen, abgesehen von der Frequenzmessung, nicht auf. Das Phänomen wird von den Studierenden als sehr interessant und reizvoll beschrieben, und die Teilnehmer berichten insbesondere bei diesem Phänomen von zahlreichen Diskussionsrunden und Recherchen auch außerhalb des Seminars.

Das *Phänomen zum Spannungsbegriff* in Kapitel 5 macht bei der Vorführung auf Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem Spannungsbegriff aufmerksam. Ausgehend von grundsätzlichen Fragen wie: „Warum sind überhaupt Spannungen messbar?“ ergeben sich schnell weitere Fragen, die deutlich tiefer gehende Untersuchungen erfordern (z.B. Abschnitt 5.3.1 oder 5.3.2). Es zeigte sich, dass sowohl bei den ausgebildeten Lehrern, als auch bei den Studierenden fachliche und experimentelle Probleme auftraten. Aus diesem Grund habe ich das Phänomen auch nur Studierenden der Sekundarstufe 2 vorgelegt. Interessanterweise kommen diese im Laufe ihrer Untersuchungen teilweise zu beachtlichen Ergebnissen (Abschnitt 5.4.3 und 5.4.4). Die Frage, unter welchen Umständen die Anzeige eines Messgerätes vertrauenswürdig ist, wurde dabei plötzlich von großer Bedeutung.

Natürlich kann man als Lehrender von den Studierenden kaum erwarten, dass sie während oder nach der Beschäftigung mit diesem Phänomen ihre Vorstellungen zum Spannungsbegriff grundsätzlich ändern (was in der Praxis auch nicht passiert). Aber die Tatsache, dass sie auf bestimmte Widersprüche mit den von ihnen bisher gelernten Definitionen aufmerksam werden, kann zumindest Anlässe zum Überdenken geben.

Im Laufe meiner Beschäftigung mit dem Phänomen *Magnetkugelbahn* in Kapitel 6 wurde mir besonders deutlich, wie wichtig ein gewisser „höherer Standpunkt“ des Lehrenden beim Einsatz eines solchen Phänomens in einem offenem Experimentierseminar ist. Einfache und bekannte Sätze, wie die Erhaltung von Energie und Impuls, sind im Rahmen eines derart komplexen Zusammenhangs deutlich schwieriger anzuwenden als zunächst angenommen (Abschnitt 6.2.2). Die Studierenden in meinem Experimentierseminar gingen mit diesen Sätzen eher locker um. „Die Energie und Impulserhaltung gilt immer bzw. muss immer gelten.“ In diesem Zusammenhang wurde nicht nach „kräftefreien Systemen“ gesucht oder gefragt. Es zeigt sich aber, dass die Frage nach der Impulserhaltung bei diesem Phänomen wirklich nicht einfach zu beantworten ist und einen gewissen höheren Kenntnisstand erfordert (Abschnitt 6.4.5). Auch ich musste mich sehr lange mit diesem Phänomen beschäftigen, um solche Fragen sicher beantworten zu können. Viele Fragestellungen der Studierenden beziehen sich auf energetische Aspekte. Auffällig ist, dass viele Gruppen dazu tendieren, die „zusätzliche“ Energie einfach dem Magneten zuzuschreiben: „Die Energie kommt vom Magneten“ (Abschnitt 6.5.3.1). Andererseits werden aber auch experimentelle Feinheiten wie die Tatsache, dass das Phänomen bei großen Geschwindigkeiten nicht mehr so leicht zu beobachten ist, von den Studierenden im Laufe ihrer Untersuchungen wahrgenommen (Abschnitt 6.5.3).

Das Phänomen *Der Blick ins Weinglas* in Kapitel 7 bietet von allen in dieser Arbeit diskutierten Phänomenen die meisten möglichen Aspekte zur Untersuchung. Diese Tatsache macht das Phänomen zu einem besonders geeigneten Kandidaten für eine offene experimentelle Arbeitsweise. Leider entstehen dadurch auch Schwierigkeiten, da es den Gruppen teilweise schwer fällt, die einzelnen physikalischen Aspekte von einander zu isolieren (Abschnitt 7.3.3). Die Gruppen versuchten in der Regel herauszufinden, von welchen Parametern die Aspekte, für die sie sich interessierten, abhängig sind. Dabei wurden auch gänzlich neue Beobachtungen gemacht, die mir bei meinen Vorbereitungen nicht aufgefallen waren (z.B. Abschnitt 7.3.4).

Wie vielfältig und komplex der Prozess des Experimentierens sein kann, wurde mir bei meiner Beschäftigung mit den *Abbildungen mit einer CD* in Kapitel 8 deutlich. Deshalb nahm ich meinen Erkenntnisprozess beim Experimentieren an diesem Phänomen besonders genau unter die Lupe. Der Experimentierprozess war von vielen Irrwegen und Sackgassen geprägt. Obwohl ich der Überzeugung bin, im Laufe meiner Tätigkeiten eine Reihe experimenteller Erkenntnisse gewonnen zu haben, muss ich davon ausgehen, dass sowohl Studierende, als auch ausgebildete Lehrer kaum eine Chance haben, bei ihren Untersuchungen diesen (oder einen vergleichbaren) Weg zu beschreiten. Studierende haben im Seminar nur eine Bearbeitungszeit von vier Wochen zur Verfügung. Das Phänomen ist daher aufgrund seines hohen fachlichen und experimentellen Anspruchs nicht für eine offene Experimentierweise geeignet.

9.1. Offenes Experimentieren: Erfolgsrezept oder Fehlschlag?

Das Resümee dieser Arbeit sollte erste Antworten auf die Frage geben, ob und wie sich eine solche offene Form des Experimentierens im Rahmen der Lehramtsausbildung bewährt. Das übergeordnete Ziel bestand darin, mit Hilfe der Ausgangsphänomene eine möglichst selbständige und praxisorientierte Auseinandersetzung mit einem physikalischen Thema bei den Seminarteilnehmern zu erreichen. Die Phänomene sollten so geschaffen sein, dass die Studierenden von ihnen ausgehend in einer Weise experimentieren, die den in Kapitel 1 und Abschnitt 2.2.3 genannten Merkmalen genügt und in deren Sinn als „naturwissenschaftlich“ bezeichnet werden kann.

Darunter verstehen wir Merkmale, die mit dem Begriff „new experimentalism“ im Einklang stehen (Kapitel 2.2.3):

- Das Verhältnis zwischen Theorie und Experiment ist ständigen Veränderungen unterworfen.
- Experimentieren bedeutet direktes „Eingreifen“ in die Natur,
- Es müssen dabei experimentelle Strategien verfolgt werden, die Kreativität voraussetzen.
- Das Scheitern von Experimenten gehört zum „Forschungsalltag“.

Die gegenseitige Abhängigkeit von Theorie und Experiment wird an vielen Stellen deutlich. Bei meinen eigenen experimentellen Tätigkeiten zeigt sich dies besonders bei den *Abbildungen mit einer CD*. Hier diente das Experiment zur Bildung einer Theorie und umgekehrt. Experimentieren kann nicht nur Beobachten bedeuten, sondern auch direktes Eingreifen in die Natur bzw. in den Untersuchungsgegenstand. Dabei wird untersucht, wie sich das Phänomen beim Variieren bestimmter Versuchsparameter verhält. Bei der *Magnetkugelbahn* bedeutet das beispielsweise die Variation der Position des Magneten innerhalb der Kette oder das Rollen der Kugel(n) auf Bahnen unterschiedlichen Geometrien. Bei der Untersuchung der Lichtquelle der *Rotierenden Farbscheibe* entwickeln die Studierenden verschiedene, unterschiedlich kreative experimentelle Strategien (Abschnitt 4.4.3). Gleiches gilt sowohl für das Phänomen zum Spannungsbegriff bei der Untersuchung der Kabelführungen (Abschnitt 5.4.1), oder der Bestimmung der induzierten Spannung (Abschnitt 5.4.4) als auch für die Untersuchung der Lichtlinien beim *Blick ins Weinglas* in Abschnitt 7.3.3.

Auch das Scheitern von Untersuchungsansätzen wurde von den Seminarteilnehmern erlebt. Solche Momente gab es bei allen Phänomenen. Besonders auffällig waren sie für mich bei den eher

„einfachen“ Erprobungsversuchen, nämlich bei der Vermessung der Diode in Abschnitt 3.1.1.5 (seltsamer Stromkreis) oder der Untersuchung der elektrischen oder magnetischen Wechselwirkung der Heftzwecken in Abschnitt 3.3. Insgesamt kann man festhalten, dass die Studierenden in einer Weise experimentieren, die sich im Einklang mit den oben genannten Punkten befindet. Es fällt mir immer wieder auf, dass viele Studierende, besonders zu Beginn des Seminars, dazu neigen, quantitative Messungen durchzuführen. Aus Diskussionen, die ich mit ihnen geführt habe, ging hervor, dass sie sich zu diesem Zeitpunkt noch nicht klar darüber waren, was sie mit den Messwerten anfangen konnten. Offenbar hatten sie in vielen Fällen das Gefühl, dass sie ohne das Aufnehmen von Messdaten und Protokollieren in Tabellen zu keinen (aus physikalischer Sicht) adäquaten Ergebnissen kommen können. Die Tatsache, dass sich ein großer Teil der experimentellen Arbeit in Form von Beobachtungen oder qualitativen Untersuchungen vor einer Messung abspielt, wird ihnen scheinbar erst im Laufe des Seminars bewusst. Ich konnte eine solche, auf das vorschnelle Messen hin ausgerichtete Vorgehensweise der Studierenden gegen Ende des Seminars nicht mehr beobachten. Natürlich kann eine offene Experimentierweise auch Schattenseiten besitzen. Horstendahl et. al. [37] haben bereits gezeigt, dass ein größerer „Offenheitsgrad“ eines Experiments sich nicht automatisch positiv auf die Motivation der Lernenden auswirken muss. In einer offenen Lernsituation besteht immer eine gewisse Gefahr, dass die Lernenden überfordert werden (was sich negativ auf ihre Motivation auswirken kann). Treten solche Situationen auf, so habe ich versucht, den Teilnehmern kleine Hilfestellungen zu geben, die jedoch ihren Untersuchungspfad nicht merklich veränderten. Beispiele dafür werden in den Kapiteln 3.1.1.5 und 4.4.3.1 beschrieben.

Offenes Experimentieren ist immer mit einem großen Zeitaufwand verbunden. Nach Aussagen vieler Gruppen fand ein großer Teil ihrer Diskussionen außerhalb des Seminars statt. Trotzdem gaben sie an, sie hätten die Bearbeitungszeit eines Phänomens (2 Stunden pro Woche vier Wochen lang) als angemessen empfunden. In offenen Experimentiersituationen entstehen oft Überraschungen, sowohl für die Lernenden, als auch für den Betreuer. Ich empfand es oft als Überraschung, wenn ein zunächst scheinbar überschaubares und „einfaches“ Phänomen plötzlich sehr knifflige Messmethoden (Kapitel 3.1.1.5) oder Untersuchungsmethoden (Kapitel 4.3) zur weiteren Erlangung von Erkenntnissen erfordert.

Insgesamt würde ich den Einsatz der Phänomene in dieser offenen Form im Seminar als Erfolg bezeichnen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Phänomene den fachlichen und experimentellen Vorkenntnissen der Lernenden entsprechend eingesetzt werden.

9.2. Ausblick

Diese Arbeit hat gezeigt, dass an den untersuchten Phänomenen bestimmte „naturwissenschaftliche experimentelle Tätigkeiten“ möglich sind und auch von Lernenden durchgeführt werden. Es wurden aber auch mögliche Probleme in Form von festen Randbedingungen deutlich. Bei der Übertragung einer offenen Experimentierweise in die Schule wird dieser Punkt noch viel wichtiger. Eine weitere Erforschung experimenteller Tätigkeiten ist sowohl in der Schule (für entsprechende Phänomene), als auch in der universitären Ausbildung (möglicherweise an diesen Phänomenen) sinnvoll. Einige wichtige Fragen, die sich aus dieser Arbeit ergeben, lauten daher:

1. Wie kann man eine im Sinne dieser Arbeit offene experimentelle Arbeitsweise unter Berücksichtigung der Randbedingungen¹ in adäquater Weise in die Schule integrieren?

¹Die Randbedingungen sind hauptsächlich: 1. hohe Klassenstärken mit 2. nur einer Lehrkraft, 3. geringer Zeit-

2. Inwieweit trägt diese Form des offenen Experimentierens zu einer Verbesserung des Verständnisses über die „Natur der Naturwissenschaften“ bei?
3. Durch welche Zusatzimpulse kann der Lehrer den Experimentierprozess der Lernenden positiv beeinflussen (ohne dabei die Offenheit der Lernsituation einzuschränken)?
4. Durch welches Verhalten kann der Lehrer die Reflexion der Handlungen der Lernenden fördern?
5. Es müssen weitere Ausgangsphänomene (insbesondere solche, die sich für den Schulunterricht eignen) gesucht und gefunden werden. Wie können solche Phänomene aussehen?

Darüber hinaus erscheint es mir sinnvoll, die affektive Komponente der Phänomene genauer zu untersuchen. Aus meiner Sicht gibt es zumindest Hinweise darauf, dass Studierende einige der Ausgangsphänomene „interessant“ und „motivierend“ finden. Dies geht beispielsweise aus Gesprächen hervor: „Die Farbscheibe fand ich sehr interessant und ästhetisch... ich hätte gern noch mehr Zeit zum Experimentieren gehabt.“. Es gibt auch sehr viele engagierte Studierende, die Experimentiermaterial von zu Hause mitbringen oder in der Werkstatt eigene Aufbauten entwerfen bzw. modifizieren. Darüber hinaus wird mir immer wieder berichtet, dass die Veranstaltung bei den Teilnehmern sehr beliebt sei: „Da konnten wir endlich mal ohne „Druck“ experimentieren“ oder „Da ist es auch nicht schlimm, wenn ein Experiment mal nicht klappt [...] offensichtlich muss es auch nicht immer klappen“. Meine Arbeit bietet eine solide Grundlage für solche Untersuchungen. Sie kann möglicherweise Antworten auf noch ausstehenden Fragen liefern, und möglicherweise einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des experimentell ausgerichteten physikalischen Ausbildung leisten.

rahmen, 4. schwierige Abprüfbarkeit von Leistungen und 5. eine hohe Inhomogenität der Schülerleistungen.

Zum Spannungsbegriff

A.1. Bezugspfeile

Elektrische Feldgrößen wie Spannung oder Stromdichte sind erst durch die Wahl eines geeigneten Bezugssystems eindeutig bestimmt [7]. Aus den Überlegungen im Kapitel Spannung wird deutlich, dass ein eindeutiges Bezugssystem unerlässlich ist. Wie wollen nun zuerst die wesentlichen, physikalischen Größen festlegen, damit Orientierungen und Pfeilrichtungen durchsichtiger werden.

A.1.1. Die elektrische Stromstärke

Die Richtung des Stromdichtevektors wird durch die Kontinuitätsgleichung eindeutig festgelegt, wenn das Vorzeichen der Ladung bereits eindeutig festgelegt ist.

$$\dot{\rho} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (\text{A.1})$$

Dadurch zeigt \vec{j} immer aus Gebieten mit abnehmender Ladung heraus. Die Stromstärke durch eine Fläche A ist gegeben durch:

$$I = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{a} \quad (\text{A.2})$$

Demnach ist die Stromstärke ein Skalar. Das Vorzeichen ist festgelegt, wenn die Richtung des Flächennormalvektors festgelegt wurde. Dies ist gleichbedeutend mit der Festlegung eines Umlaufsinnns innerhalb einer Masche.

A.1.2. Der magnetische Fluss

Die Definition des magnetischen Flusses ist vergleichbar mit der der elektrischen Stromstärke.

$$I = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{a} \quad \text{und} \quad \Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{a} \quad (\text{A.3})$$

Daher ist das Vorzeichen von Φ ebenso wie bei der elektrischen Stromstärke durch die Richtung des Flächennormalvektors festgelegt.

A.1.3. Die elektrische Spannung

Unter der Spannung U_{AB} zwischen zwei Punkten A und B wird das Linienintegral über die elektrische Feldstärke verstanden. Dabei verläuft der Integrationsweg vom Punkt A nach Punkt B. Im zeitunabhängigen Fall ist der Wert der Spannung nur von den Endpunkten des Weges abhängig. Bei Anwesenheit von Induktion müssen die Endpunkte A und B, sowie der Integrationsweg eindeutig kenntlich gemacht werden.

$$U_{AB} = \int_{A,C}^B \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (\text{A.4})$$

A.1.4. Die Messspannung eines Voltmeters bei Abwesenheit von Induktion

Die Spannung, die von einem Voltmeter gemessen wird, ist:

$$U_M = \int_{+,C}^- \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (\text{A.5})$$

Dabei verläuft der Integrationsweg C von der mit „+“ bezeichneten Buchse durch das Voltmeter bis hin zu der mit „-“ gekennzeichneten Buchse. Wird ein Voltmeter an zwei Punkten A, B an eine Schaltung angeschlossen, so stimmen U_M und U_{AB} bei Abwesenheit von Induktion genau dann im Vorzeichen überein, wenn die „+“ Buchse des Voltmeters mit A und die „-“ Buchse mit „B“ verbunden wird.

A.2. Das Ohm'sche Gesetz

Zwischen der elektrischen Stromdichte und dem elektrischen Feld in einem Leiter besteht ein Zusammenhang, der durch das (mikroskopische) Ohm'sche Gesetz beschrieben wird.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{A.6})$$

Die Stromdichte \vec{j} ist demnach proportional zum Feld \vec{E} und hat dieselbe Richtung. Der Proportionalitätsfaktor ist die Leitfähigkeit σ des Materials.

A.3. Die zeitliche Änderung des Magnetfeldes und seine Richtung

Da das Magnetfeld \vec{B} einen Vektor darstellt, ist seine zeitliche Änderung $\dot{\vec{B}}$ ebenfalls ein Vektor.

$$\dot{\vec{B}} = \frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t} = \frac{\vec{B}(t_2) - \vec{B}(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (\text{A.7})$$

Die Richtung von $\dot{\vec{B}}$ wird daher durch die Vektordifferenz $\vec{B}(t_2) - \vec{B}(t_1)$ bestimmt. Angenommen ein Dauermagnet wird auf eine gedachte Leiterschleife (Abb. A.1 gestrichelt) zu bewegt, und wir fragen nach der Richtung der Feldänderung $\Delta \vec{B}$. Das Magnetfeld $\Delta \vec{B}$ zeigt nach oben, wenn der Dauermagnet mit seinem Nordpol auf die Schleife zu bewegt wird (Abb. A.1. Die zeitliche Änderung $\dot{\vec{B}}$ ist daher ebenfalls nach oben gerichtet.

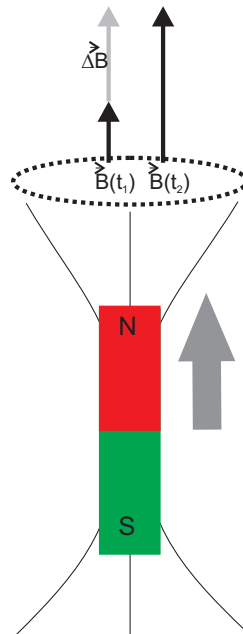


Abbildung A.1.: Ein Dauermagnet wird relativ zu einer gedachten Leiterschleife bewegt. Der Nordpol wird auf die Schleife zu bewegt und $\Delta \vec{B}$ zeigt nach oben.

A.4. Induktion in einer runden Leiterschleife

An dieser Stelle soll ein Beispiel diskutiert werden, an dem die konsequente Anwendung des Induktionsgesetzes verdeutlicht wird. Wir betrachten eine runde geschlossene Leiterschleife, die von einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld durchsetzt ist.

Die zeitliche Änderung des Magnetfeldes $\dot{\vec{B}}$ zeige senkrecht nach oben. Dabei wird das Beispiel aus Abschnitt A.3 betrachtet.

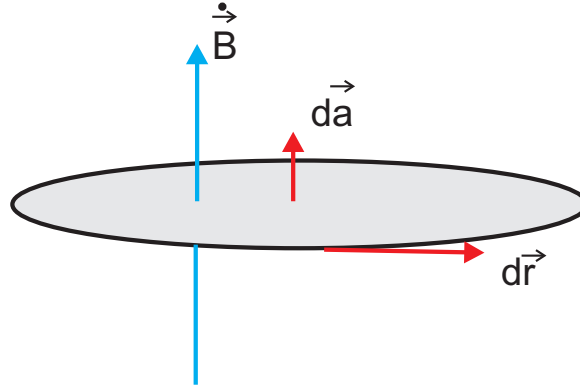


Abbildung A.2.: Zur Bestimmung des induzierten Stroms in einer runden Leiterschleife. Die Richtung des Vektors $d\vec{a}$ wird vorgegeben, damit ist auch die Richtung von $d\vec{r}$ festgelegt².

Wir fragen nach der Richtung des Stroms, der in dieser Leiterschleife induziert wird. Das Induktionsgesetz¹ lautet:

$$\int_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\dot{\Phi} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{a} = - \int_A \dot{\vec{B}} \cdot d\vec{a} \quad (\text{A.8})$$

Da wir uns für den Strom innerhalb der Leiterschleife interessieren, benutzen wir das (mikroskopische) Ohm'sche Gesetz $\vec{j} = \sigma \vec{E}$:

$$\frac{1}{\sigma} \int_C \vec{j} \cdot d\vec{r} = - \int_A \dot{\vec{B}} \cdot d\vec{a} \quad (\text{A.9})$$

Da bei unseren Betrachtungen $\dot{\vec{B}}$ nach oben zeigt (ebenso wie $d\vec{a}$ in Abb. A.2), nimmt das Integral auf der rechten Seite, die Änderung des magnetischen Flusses, einen positiven Wert an. Somit ergibt sich:

$$R \cdot I = \frac{1}{\sigma} \int_C \vec{j} \cdot d\vec{r} = -\dot{\Phi} \quad (\text{A.10})$$

Gibt man die Richtung des Flächennormalvektors vor, so liegt damit gleichzeitig auch die Richtung des Linienvektors fest². Die rechte Seite der Gleichung ist also negativ. Da die Leitfähigkeit links immer positiv ist, muss das Integral auf der linken Seite einen negativen Wert besitzen. Das bedeutet, dass der Vektor \vec{j} in die entgegengesetzte Richtung zeigt wie der Linienvektor $d\vec{r}$. Der Strom fließt demnach in diesem Fall, von oben betrachtet, im Uhrzeigersinn durch den Leiter -oder: Die Stromstärke in diesem Leiter hat bezüglich eines Umlaufsinn in Richtung von $d\vec{r}$ negative Werte.

¹Bei zeitlich konstanter Fläche kann die Differentiation in das Integral hineingezogen werden.

²Der Vektor $d\vec{a}$ bildet mit dem durch den Vektor $d\vec{r}$ definierten Umlaufsinn ein Rechtssystem.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Allchin. Scientific myth-conceptions. *Science Education* 87, pages 329–351, 2003.
- [2] C. Anders R Berg et al. Benefiting from an open-ended experiment? A comparison of attitudes to, and outcomes of, an expository versus an open.inquiry version of the same experiment. *Int. J. Sci. Educ.* 25/3, pages 351–372, 2003.
- [3] U. Backhaus. Simulationsprogramm zur Brechung von Lichtstrahlen in einem runden Wassertropfen. 2006.
- [4] U. Backhaus. Simulationsprogramm zur Brechung von Lichtstrahlen in einem Weinglas. 2006.
- [5] U. Backhaus. Simulationsprogramme zur Beugung und Brechung von Lichtstrahlen an einer durchsichtigen CD-Scheibe. 2007.
- [6] U. Backhaus et al. Physikbuch 7/8. *Diesterweg: Frankfurt a.M.*, 1995.
- [7] U. Backhaus und T. Braun. Der Begriff der elektrischen Spannung und seine Messung in Gegenwart von zeitlich veränderlichen Magnetfeldern. *Phy. Did.* 5/1, pages 45–53, 2006.
- [8] L. Bergmann und C. Schaefer. Lehrbuch der Experimentalphysik Band 1. *de Gruyter*, 1998.
- [9] D.J. Boud. The laboratory aims questionnaire - a new method for course improvement. *Higher Education* 2, pages 81–94, 1973.
- [10] G. Boysen et al. Oberstufe Physik Band 2. *Berlin, Cornelsen*, 1998.
- [11] T. Braun. Simulationsprogramme zur Beugung von Lichtstrahlen an kreisförmigen Gittern. 2007.
- [12] T. Braun und U. Backhaus. Der Weg der experimentellen Erkenntnisgewinnung am Beispiel durchsichtiger CD-Scheiben. *DPG-Frühjahrstagung Didaktik der Physik, Berlin, Lehmanns Media*, 2008.
- [13] T. Braun und U. Backhaus. Optische Experimente mit durchsichtigen CD-Scheiben. *MNU* 62/4, pages 218–227, 2009.
- [14] Brechungsindex vom Polycharbonat <http://www.eschenbach-optik.com/de/Kunststoffe.771.0.html>. Stand: 10/2007.
- [15] M. Carrier. New experimentalism and changing significance of experiments in: M. Heidelberger und F. Steinle: *Experimental Essays. Baden Baden, Nomos*, 1998.

- [16] V. Carter. Dictionary of education. *New York, Mc Graw Hill*, 1973.
- [17] DLP- und LCD-Technik.: <http://www.artm-friends.at/beamer/> oder [http://archiv.chip.de/artikel/Beamer Grundlagen 4 Stand: 05/08](http://archiv.chip.de/artikel/Beamer_Grundlagen_4_Stand:_05/08).
- [18] D.S. Domin. A review of laboratory instruction styles. *J. Chem. Educ.* 76, pages 543–547, 1999.
- [19] K. Engeln und M. Euler. Physikunterricht modernisieren - Erfahrungen aus Kooperationsprojekten zwischen Schule und Wissenschaft. *IPN Materialien*, 2005.
- [20] L. Finegold. Open-ending a senior modern physics laboratory. *Am. J. Phys.* 40/10, pages 1383–1388, 1972.
- [21] M. Francon. Physik für Biologen, Chemiker und Geologen Band 1. *Teubner*, 1971.
- [22] A. Franklin. Review artikel: The epistemology of experiment. *Brit. J. Phil. Sci.* 35, pages 381–401, 1984.
- [23] S.G. Gangoli. A study of the effectiveness of a guided open-ended approach to physics experiments. *Int. J. Sci. Educ.* 17/2, pages 233–241, 1995.
- [24] J.W. George Ivany. The divergent laboratory. *Am. J. Phys.* 36/11, pages 1072–1080, 1968.
- [25] M.Chr. Gieseke und D. Haubrock. Physik und Compact Discs. *PdN Phys.* 48/6, pages 17–22, 1999.
- [26] H.G. Graetzer. Cumulative experiments in the advanced laboratory. *Am. J. Phys.* 40, pages 270–276, 1972.
- [27] G. Hacker. Eine überraschende Beobachtung an einer CD. *DPG-Frühjahrstagung Didaktik der Physik, Berlin, Lehmanns Media*, 1998.
- [28] I. Hacking. Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften. *Stuttgart, Reclam*, 1996.
- [29] E. Hecht. Optik. *Oldenbourg*, 2005.
- [30] M. Heidelberger. Die Erweiterung der Wirklichkeit im Experiment in: M. Heidelberger und F. Steinle: Experimental Essays. *Baden Baden: Nomos*, 1998.
- [31] K. Hentschel. Historische Anmerkungen zum Verhältnis von Experiment, Instrument und Theorie. in: C. Meinel, *Instrument-Experiment: Historische Studien, Berlin, Diepholz*, pages 13–51, 2000.
- [32] F. Hermann und G. Job. Altlasten der physik. *Köln, Aulis Deubner*, 2002.
- [33] F. Hermann und M. Seitz. How does the ball chain work? *Am. J. Phys.* 50/11, pages 977–981, 1982.
- [34] F. Hermann und P. Schmälzle. Simple explanation of a well known collision experiment. *Am. J. Phys.* 49/8, pages 761–764, 1981.

- [35] D. Hodson. A critical look at practical work in school science. *School science review* 70/256, pages 33–40, 1990.
- [36] A. Hofstein und V.N. Lunetta. The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education* 88, pages 28–54, 2004.
- [37] M. Horstendahl et al. Konzeptuelle und motivationale aspekte der Handlungsregulation von Schülerinnen und Schülern im Experimentalunterricht der Physik. *ZfDN* 6, pages 7–25, 2000.
- [38] D. Höttecke. Die Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern über die Natur der Naturwissenschaften. *ZfDN* 7, pages 7–23, 2001.
- [39] D. Höttecke. Fachliche Klärung des Experimentierens. *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Essen 2007*, 2008.
- [40] D. Höttecke. Was ist Naturwissenschaft? Physikunterricht über die Natur der Naturwissenschaften. *Unterricht Physik* 19/103, pages 4–8, 2008.
- [41] D. Höttecke und F. Rieß. Rekonstruktion der Vorstellungen von Physikstudierenden über die Natur der Naturwissenschaften. *Phy. Did.* 6/1, pages 1–14, 2007.
- [42] L. Hücke. Handlungsregulationen und Wissenserwerb in traditionellen und computerunterstützten Experimenten des physikalischen Praktikums. *Berlin, Logos*, 2000.
- [43] KMK Bildungsstandarts im Fach Physik. Beschluss vom 16.12.2004. *München, Luchterland*, 2004.
- [44] E. Jürgens. Die neue Reformpädagogik und die Bewegung Offener Unterricht. *Academia*, 2000.
- [45] D. Kagan. Energy and momentum in the Gauss Accelerator. *Phys. Teacher* 42, 2004.
- [46] T. Kersting, V. Nordmeyer und H.J. Schlichting. Viana - Automatische Videoanalyse. *DPG-Frühjahrstagung Didaktik der Physik, Berlin, Lehmanns Media*, 1998.
- [47] J.G. King. On physics project laboratories. *Am. J. Phys.* 34/11, pages 1058–1062, 1966.
- [48] E. Kircher. Empirische Untersuchungen zum Spannungsbegriff in der Sekundarstufe 1. *DPG-Frühjahrstagung Didaktik der Physik, Berlin, Lehmanns Media*, 1986.
- [49] E. Kircher et al. Physikdidaktik. *Springer*, 2007.
- [50] P.A. Kirschner. Epistemology, practical work and academic skills in science education. *Science and Education* 1, pages 273–299, 1992.
- [51] H. Küppers. Farbenlehre. *Dumont*, 2005.
- [52] T.S. Kuhn. Die Entstehung des Neuen: Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte. *Frankfurt am Main, Suhrkamp*, 1977.
- [53] P. Lay, H. Chmela und W. Wiedergut. Das große Freie Energie Experimentier Handbuch. *Franzis*, 2004.

- [54] J.v. Liebig. Über Francis Bacon von Verulam und die Methode der Naturforschung. *München, Cotta*, 1863.
- [55] V.N. Lunetta. The school science laboratory: Historical perspectives and contexts for contempoary teaching. *International Handarticle of Science Education Pt 1*, pages 249–262, 1998.
- [56] U. Maichle. Schülervorstellungen zu Stromstärke und Spannung. *Naturwissenschaften im Unterricht 30/11*, pages 383–387, 1982.
- [57] R. Marshall. A practical guide to open-ended coursework investigations. *Phys. Ed. 37/5*, pages 376–380, 2002.
- [58] W.F. McComas und H. Almazora. The nature of science in science education: An introduction. *Science and Education 7*, pages 511–532, 1998.
- [59] H. Meyling. How to change student’s conceptions of the epistemology of science. *Science and Education 6*, pages 397–416, 1997.
- [60] D.R. Moorcroft. Faraday’s Law-Demonstration of a Teaser. *Am. J. Phys. 37*, page 221, 1969.
- [61] M.A. Moreira. A non-traditional approach to the evaluation of laboratory instruction in general physics courses. *Eur. J. sci. ed. 2/4*, pages 441–448, 1980.
- [62] K. Neumann. Didaktische Rekonstruktion eines physikalischen Praktikums für Physiker. *Berlin, Logos*, 2004.
- [63] R. Pelster und I. Hüttl. Verblüffende Spannungsmessungen: Experimente zu einem elektrodynamischen Paradoxon. *Phy. Did. 3/1*, pages 30–38, 2004.
- [64] A. Pickering. Living in the material world in: D. Gooding T. Pinch und S. Schaffer, The uses of experiment - Studies in the natral sciences. *Cambridge University Press*, 1999.
- [65] W.T. Plummer und L.R. Gardner. A mechanically generated hologram? *Applied Optics 31/31*, pages 6585–6588, 1992.
- [66] C. Popper. Logik der Forschung. *Mohr-Siebeck*, 1935.
- [67] P. Reinhold. Offenes Experimentieren und Physiklernen. *IPN Kiel*, 1996.
- [68] F. Rieß. Erkenntnis durch Wiederholung in: M. Heidelberger und F. Steinle: Experimental Essays. *Baden Baden, Nomos*, 1998.
- [69] M.C. Robinson. Undergraduate laboratories in physics: Two philosophies. *Am. J. Phys. 47/10*, pages 859–862, 1979.
- [70] R.H. Romer. What do voltmeters measure? faraday’s law in a multiply connected region. *Am. J. Phys. 50/12*, pages 1089–1093, 1982.
- [71] G. Ruickoldt. Ergebnisse einer Umfrage zum Physikalischen Praktikum. *Phys. Bl. 52/10*, pages 1022–1024, 1996.

- [72] F.W.J. Schelling. Sämtliche Werke. *Stuttgart und Augsburg, Cotta 1856-1861, Bd. 3*, 1799.
- [73] H.J. Schlichting. Das Schwert der Sonne, Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens Teil 1. *MNU 51/7*, pages 387–397, 1998.
- [74] H.J. Schlichting. Das Schwert der Sonne, Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens Teil 2. *MNU 52/6*, pages 330–336, 1999.
- [75] H.J. Schlichting. Attraktive Kugeln. *Physik in unserer Zeit 36/5*, page 243, 2005.
- [76] H.J. Schlichting. Oberflächliche attraktionen. *PdN-PhiS 2/55*, pages 2–6, 2006.
- [77] H.J. Schlichting und W. Suhr. Kinetische Farben. *Physik in unserer Zeit 4/38*, pages 198–200, 2007.
- [78] W.B. Schneider und K.H. Lotze. Wege in der Physikdidaktik Band 5: Naturphänomene und Astronomie. *Erlangen, Palm und Enke*, 2002.
- [79] G. Schurz. Einführung in die Wissenschaftstheorie. *Darmstadt, WBG*, 2006.
- [80] J.I. Shonle. Project laboratory in electricity and magnetism. *Am. J. Phys. 35/9*, pages 792–796, 1967.
- [81] F. Steinle. Exploratives vs. theoriebestimmtes Experimentieren in: M. Heidelberger und F. Steinle: Experimental Essays. *Baden Baden, Nomos*, 1998.
- [82] R. Strehlow. Grundzüge der Physik. *Vieweg*, 1995.
- [83] W. Suhr. Stellung und Zielsetzung des Experimentalpraktikums in der Physikausbildung. *DPG-Frühjahrstagung Didaktik der Physik, Berlin, Lehmanns Media*, 2002.
- [84] M. Sussman. Elementary diffraction theory of zone plates. *Am. J. Phys. 28/4*, pages 394–398, 1960.
- [85] Technische Daten von CD Rohlingen entnommen aus: <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/0608021.htm>. Stand: 10/2007.
- [86] M. Tesch und R. Duit. Experimentieren im Physikunterricht - Ergebnisse einer Videostudie. *ZfDN 10*, pages 51–69, 2004.
- [87] H. Tetens. Experimentelle Erfahrung - Eine Wissenschaftstheoretische Studie über die Rolle des Experiments in der Begriffs und Theoriebildung der Physik. *Hamburg, Felix Meiner*, 1987.
- [88] W.S. Toothacker. A critical look at introductory laboratory instruction. *Am. J. Phys. 51/6*, pages 516–520, 1983.
- [89] E. Töpfer und J. Bruhn. Methodik des Physikunterrichts. *Heidelberg, Quelle und Meyer*, 1976.
- [90] N. Treitz. Spiele mit Physik! *Frankfurt am Main, Harri Deutsch*, 1991.

- [91] G. Trendel und H.E. Fischer. Naturwissenschaftliche Arbeitsweisen. *MNU* 60/7, pages 388–394, 2007.
- [92] D. Vella und L. Mahadevan. The cheerios effect. *Am. J. Phys.* 73/9, pages 817–825, 2005.
- [93] W. Wallrabenstein. Offene Schule-Offener Unterricht. *Rowohlt*, 1998.
- [94] J.R. Warren. Understanding force. *London, John Murray*, 1976.
- [95] M. Welzel et al. Ziele, die Lernende mit dem Experimentieren in der naturwissenschaftlichen Ausbildung verbinden - Ergebnisse einer europäischen Umfrage. *ZfDN* 4/1, pages 29–44, 1998.
- [96] I. Wolff. Grundlagen der Elektrotechnik. *Aachen, Nellissen-Wolff GmbH*, 1997.
- [97] B. Woolnough. Exercises, investigations and experinences. *Phys. Educ.* 18, pages 60–63, 1983.